

**Kraft, Dietmar**

**Untersuchungen zur Detektion und Kontrolle der  
Schweißnahtqualität beim Heizelementstumpfschweißen von  
Thermoplasten unter Berücksichtigung der  
Wärmestrombilanzierung**

**Fertigungstechnik –  
aus den Grundlagen für die Anwendung**  
Schriften aus der Ilmenauer Fertigungstechnik

Herausgegeben von  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jean Pierre Bergmann  
(Technische Universität Ilmenau).

**Band 4**

**Untersuchungen zur Detektion und  
Kontrolle der Schweißnahtqualität  
beim Heizelementstumpfschweißen  
von Thermoplasten unter  
Berücksichtigung der  
Wärmestrombilanzierung**

Kraft, Dietmar



Universitätsverlag Ilmenau

2017

## Impressum

### Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Diese Arbeit hat der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung: 1. Februar 2016  
1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jean Pierre Bergmann  
(Technische Universität Ilmenau)  
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Volker Schöppner  
(Universität Paderborn, Paderborn)  
3. Gutachter: Jun.-Prof. Dr.-Ing. Sergio Amancio  
(Technische Universität Hamburg)  
Tag der Verteidigung: 02. Dezember 2016

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

### Universitätsverlag Ilmenau

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

<http://www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag>

### Herstellung und Auslieferung

readbox unipress

in der readbox publishing GmbH

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

<http://unipress.readbox.net>

**ISSN** 2199-8159 (Druckausgabe)

**ISBN** 978-3-86360-157-7 (Druckausgabe)

**URN** urn:nbn:de:gbv:ilm1-2016000818

---



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2009 - 2013 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich „Fügen von Kunststoffen“ am Süddeutschen Kunststoff-Zentrum (SKZ) in Würzburg.

Am Süddeutschen Kunststoff-Zentrum (SKZ) gilt ein besonderer Dank dem Institutsdirektor des Süddeutschen Kunststoff-Zentrums und ersten Geschäftsführer der SKZ - KFE gGmbH (Kunststoff-Forschung und –Entwicklung) Prof. Dr.-Ing. Martin Bastian und dem zweiten Geschäftsführer der SKZ - KFE gGmbH Dr.-Ing. Peter Heidemeyer. Sie haben mir am SKZ das nötige Vertrauen entgegengebracht und mich sowohl bei der Suche nach einem geeigneten Doktorvater als auch bei der Durchführung der Promotion in jeder Hinsicht bestmöglich unterstützt.

Besonders möchte ich mich bei meinem Doktorvater Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jean Pierre Bergmann bedanken, der als Fachgebietsleiter Fertigungstechnik der Fakultät für Maschinenbau an der technischen Universität in Ilmenau mir stets zur Seite stand, als eine Art Mentor fungierte und so maßgeblich zum Erfolg der Dissertation beigetragen hat. Ihm gilt mein besonderer Dank für die vielen Anregungen, Diskussionen und wertvollen Hilfestellungen während der Promotion. Er hat einen entscheidenden Beitrag dazu geleistet, dass die Arbeit in der heutigen Form existiert.

Ich möchte mich bei allen Mitarbeitern, sowohl in der Abteilung „Fügen von Kunststoffen“, als auch in den anderen Abteilungen des Süddeutschen Kunststoff-Zentrums, die mir bei dieser Arbeit mit Rat und Tat zur Seite standen, vielmals für die Zusammenarbeit bedanken. Dies gilt ebenso für die Doktoranden, Diplomanden und Studenten des SKZ sowie der technischen Universität Ilmenau.

Die Versuchsaapparaturen wie Schweißmaschinen, Sensoren und diverse andere Hilfsmittel wurden mir von der Fa. WIDOS Wilhelm Dommer Söhne GmbH, Ditzingen, der Fa. ITI Company, Del Mar, Kalifornien, USA, der Fa. MesoScribe Technologies Inc., Huntington Beach, Kalifornien, USA, der Fa. WEGENER International GmbH, Eschweiler und der Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt, Würzburg, zur Verfügung gestellt. Die Materialien stellte in erster Linie die Fa. SIMONA AG, Kirn bereit. Den Firmen sei für Ihre großzügige Unterstützung vielmals gedankt.

Letztendlich geht ein besonderer Dank noch an meine Familie, meine Frau Sandra Kraft, meine Mutter Wiltrud Kraft und meinen Bruder Andreas Kraft, die mir immer zur Seite standen, mir permanent ein Ansporn waren und mich wieder und wieder motivierten und die ganzen Jahre begleiteten. Auch für die hilfreichen Gespräche, Anregungen und Korrekturen, an dieser Stelle ein herzliches Dankeschön.

Ich möchte aus Gründen der besseren Lesbarkeit auf die gleichzeitige Verwendung von männlicher und weiblicher Formulierung verzichten. Alle Personenbezeichnungen gelten für beide Geschlechtsformen.

### **Kurzzusammenfassung**

Eine permanente Zielsetzung ist, Verarbeitungsprozesse zu optimieren, sprich bei gleichbleibender oder verbesserter Qualität den Ausschuss und den Energieverbrauch zu minimieren sowie die Geschwindigkeit und die Effizienz des Prozesses zu steigern. Die Ausarbeitung zum Thema „Untersuchungen zur Detektion und Kontrolle der Schweißnahtqualität beim Heizelementstumpfschweißen von Thermoplasten unter Berücksichtigung der Wärmestrombilanzierung“ hat sich dieser Herausforderung gestellt. Die vorliegende Arbeit zeigt, dass die Wärmestrombilanzierung mittels hochtemperatur-beständiger Wärmestromsensoren eine zuverlässige, reproduzierbare und universell einsetzbare Lösung darstellt, prozess- als auch bauteilspezifische Kennwerte beim Heizelementstumpfschweißen von Kunststoffen direkt in der Fügezone zu generieren, und mit Hilfe dieser Kennwerte das Heizelementstumpfschweißverfahren wirtschaftlicher, effizienter und ressourcenschonender in eine Fertigung zu implementieren. Hinzu kommt noch, dass in dieser Arbeit die grundlegenden Entwicklungen getätigt wurden, um sogar bisher verwendete Sensoren (vorwiegend Weg-, Kraftsensoren sowie Thermoelemente) über die Nutzung eines hochtemperaturbeständigen Wärmestromsensors zu substituieren und somit den Einsatz der Wärmestrombilanzierung nahezu kostenneutral zu realisieren. Die Möglichkeit der Inline-Qualitätssicherung entwickelt das Heizelementstumpfschweißverfahren zukunftsorientiert weiter und legt den Grundstein für einen verstärkten Einsatz dieses Fügeverfahrens.

### **Short Summary**

One permanent objective is to optimize manufacturing processes, i.e. with the quality remaining constant or even improving, to minimize waste and energy consumption and to increase the speed and efficiency of the processes. The elaboration of the subject on "Investigations of the Detection and Control of Welding Quality in Heated Tool Butt Welding of Polymers in View of Heat Flow Balancing" has risen to this challenge. Due to the use of high temperature heat flow sensors the heated tool butt welding is a common joining method in areas of polymer joining technology. The heat flow balancing is a novel possibility for an inline quality safeguard and gives the heated tool butt welding more attractiveness, a significant increase in efficiency and a process safety not known before.

This thesis elucidates the fact that the heat flow balancing using high temperature resistant heat flow sensors is a reliable, reproducible and universally applicable solution to generate process- and component-specific parameters directly in the welding zone. With the help of these parameters the heated tool butt welding can be implemented into a production in a more economical, more efficient and resource saving manner at the same time. The possibility of the inline quality protection further develops a future-oriented heating tool butt welding and lays the foundation for an increased use of this joining process.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1.	Allgemeine Marktsituation.....	1
1.2.	Kunststoffverbindungstechnik im 21. Jahrhundert .....	1
1.3.	Einsatzgebiete Heizelementstumpfschweißen von Kunststoffen.....	3
1.4.	Motivation.....	4
<b>2.</b>	<b>Stand der Wissenschaft.....</b>	<b>6</b>
2.1.	Verbindungsmechanismen und Qualitätskriterien beim Heizelementstumpfschweißen von Kunststoffen .....	6
2.1.1.	Verbindungsmechanismus.....	6
2.1.2.	Qualitätskriterien beim Heizelementstumpfschweißen .....	11
2.1.3.	Zwischenfazit Verbindungsmechanismen und Qualitätskriterien beim Heizelementstumpfschweißen von Kunststoffen .....	11
2.2.	Heizelementstumpfschweißen .....	13
2.2.1.	Verfahrensbeschreibung und Parameterauswahl bzw. Prozessoptimierung.....	13
2.2.2.	Taxonomie der Prozessanalysen.....	17
2.2.3.	Grundsätze der Prozessauslegung für das Heizelementstumpfschweißen.....	22
2.2.4.	Sensortechnologie für das Heizelement .....	42
2.2.5.	Zwischenfazit Heizelementstumpfschweißen.....	46
<b>3.</b>	<b>Wärmestrombilanzierung mittels Wärmestromsensoren .....</b>	<b>52</b>
3.1.	Grundlagen der Wärmelehre .....	52
3.2.	Aufbau und Funktion von Wärmestromsensoren .....	57
3.3.	Einsatzbereiche von Wärmestromsensoren .....	59
3.4.	Einsatzgrenzen aktueller Sensoren .....	60
3.5.	Kalibration von Wärmestromsensoren .....	61
3.5.1.	Allgemeine Situation.....	61
3.5.2.	Kalibration im Heizelementstumpfschweißprozess.....	64
3.6.	Zwischenfazit Wärmestrombilanzierung mittels Wärmestromsensoren .....	66
<b>4.</b>	<b>Herausforderungen und Chancen einer Inline- Wärmestrombilanzierung .....</b>	<b>67</b>
4.1.	Herausforderungen .....	67
4.2.	Chancen.....	69
<b>5.</b>	<b>Zielsetzung.....</b>	<b>71</b>

<b>6.</b>	<b>Versuchsdokumentation.....</b>	<b>73</b>
6.1.	Materialauswahl.....	73
6.2.	Bestimmung der Schweißnahtqualität .....	74
6.3.	Ausstattung der verwendeten Heizelementstumpfschweißmaschine.....	77
6.4.	Bestimmung Schmelzschichtdicke (SSD) und Restschmelzschichtdicke (RSSD)...	79
6.5.	Eigenschaften der verwendeten Wärmestromsensoren.....	79
6.5.1.	Aufbau und Funktion.....	79
6.5.2.	Kalibration der Sensoren.....	82
6.5.3.	Sensorintegration in den Schweißprozess.....	83
6.6.	Messtechnik / Messbedingungen .....	84
6.7.	Kriging-Korrelation zur Darstellung der Messdaten .....	85
6.8.	Versuchsaufbau zur Simulation von Wärmeleitungs- und Strahlungseinflüssen während der Anwärmzeit.....	86
<b>7.</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion.....</b>	<b>89</b>
7.1.	Wärmestrombilanzierung eines Schweißprozesses .....	89
7.1.1.	Einrichtphase.....	92
7.1.2.	Bewegungsphase vor Angleichen.....	97
7.1.3.	Angleichphase .....	101
7.1.4.	Anwärmphase.....	113
7.1.5.	Umstellphase .....	117
7.1.6.	Fügephase .....	121
7.1.7.	Zwischenfazit Inline-Wärmestrombilanzierung .....	123
7.2.	Korrelation Wärmestrombilanzierung und Nahtqualität .....	124
7.2.1.	Ansätze zur Korrelation zwischen Wärmestrombilanzierung und Nahtqualität ohne Wärmestromsensoren .....	125
7.2.2.	Korrelation Wärmestrombilanzierung und Nahtqualität .....	128
7.2.3.	Ergebnisse der Korrelationsuntersuchungen.....	133
7.2.4.	Zwischenfazit Korrelation Wärmestromdichtebilanzierung und Nahtqualität .....	138
7.3.	Besonderheiten der Wärmestrombilanzierung.....	142
7.3.1.	Kalibration von Wärmestromsensoren für Heizelementstumpfschweißanwendungen .....	142
7.3.2.	Modellierung des Schweißprozesses anhand der Wärmestrombilanzierung.....	144
7.4.	Weitere fertigungsbezogene Potentiale .....	151
7.4.1.	Positioniergenauigkeit der Probekörper auf dem Sensor.....	151
7.4.2.	Überwachung des Sensorzustands .....	154
7.4.3.	Thermische Beanspruchung des Materials .....	155
7.4.4.	Schweißparameteroptimierung.....	157
7.4.5.	Parallele Temperaturmessung.....	160

7.4.6.	Theoretische energetische Bilanzierung eines konventionellen Heizelements für das Heizelementstumpfschweißen von Kunststoffen .....	162
7.4.7.	Zwischenfazit Besonderheiten der Wärmestrombilanzierung.....	172
8.	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>175</b>
9.	<b>Abstract .....</b>	<b>179</b>
10.	<b>Ausblick.....</b>	<b>183</b>
11.	<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>185</b>
12.	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>188</b>
13.	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>198</b>
14.	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>205</b>
15.	<b>Anhang .....</b>	<b>206</b>
15.1.	Zeichnung Wärmestromsensor Fa. MesoScribe Technologies Inc. ....	206
15.2.	Versuchsaufbau Wärmestrombilanzierung am Beispiel des Wärmestromsensors der Fa. MesoScribe Technologies Inc.....	207





## **1. Einleitung**

### **1.1. Allgemeine Marktsituation**

„Die deutsche Kunststoffverarbeitung blickt verhalten optimistisch auf das Jahr 2013.“ So die Bilanz des Vorsitzenden des Gesamtverbands der kunststoffverarbeitenden Industrie e.V. (GKV) Dr. Bernd-O. Kruse bei der Jahrespressekonferenz 2013 in Frankfurt am Main [Kru13]. Auch Dr. Elmar Löckenhoff, Geschäftsführer des Fachverbands Kunststoffrohr-Industrie (KRV), sieht in seinem Falle die Kunststoffrohr-Industrie gleichermaßen vor wirtschaftliche Herausforderungen gestellt [Löc13]. Die Gründe für diese negativen Prognosen werden in stark belastenden Mehrausgaben für Rohstoffe, aber auch Personal- und Energiekosten gesehen [Kru13]. Zumal noch hinzu kommt, dass vor allem die immer kurzfristigeren und stärkeren Rohstoffpreisschwankungen sowie Überkapazitäten bei gleichzeitig ausgeprägten Wettbewerbssituationen die Märkte stark belasten [Löc13]. Zwei fundierte Stellungnahmen, die häufig postulierte Megatrends bestätigen. Global betrachtete Megatrends sind der demographische Wandel und das Bevölkerungswachstum, die Globalisierung und Urbanisierung, der Klimawandel und die Energieverknappung sowie ein beschleunigter technologischer Fortschritt. Vor allem den letzten beiden Themenkomplexen, Klimawandel und Energieverknappung sowie dem beschleunigten technologischen Fortschritt, muss sich die kunststoffverarbeitende Industrie und speziell auch die Kunststoffverbindungstechnik stellen [DVS07, DVS12-5].

### **1.2. Kunststoffverbindungstechnik im 21. Jahrhundert**

Die DVS-Forschungsagenda (DVS – Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.) „Fügen von Kunststoffen“ stellt ein über Wettbewerbsgrenzen und individuelle Interessenslagen hinweg gehendes Positionspapier dar, welches die Herausforderungen an eine nachhaltige Kunststofffügetechnik im 21. Jahrhundert aufzeigt [DVS07, DVS12-5]. Die mit der Fügetechnologie in Verbindung gebrachte Wertschöpfung verdeutlicht die Notwendigkeit einer stetigen Weiterentwicklung und Qualitätssicherung in diesem Bereich. Denn gemäß der Studie des DVS resultieren in Deutschland 22,6 Mrd. € an Wertschöpfung aus der Herstellung und der Anwendung von Fügetechnologien, was etwa 3,6 % des produzierenden Gewerbes entspricht. Die Herstellung der Fügetechniken bezieht sich auf die Produktion von Geräten zum Fügen (Herstellung von Brennern, Stromquellen, Roboteranlagen,

## 1. Einleitung

---

etc.), Systemen und komplementäre Güter (Herstellung von Zusatzwerkstoffen und Prozessstoffen wie Schweißgase, Klebstoffe, Schutzausrüstung, etc.) sowie die in dieser Branche erbrachten Dienstleistungen (in erster Linie Aus- und Weiterbildung im Bereich Fügen). Deutschland ist demzufolge der größte Produzent von Geräten und Systemen der Fügetechnik in ganz Europa und vereint ein Drittel der gesamteuropäischen Produktion auf sich. Auch bezüglich der Herstellung komplementärer Güter liegt Deutschland mit 17 % aller europäischen Güter auf Platz eins. Alleine in Deutschland erbringen derzeit 360.000 Fügetechniker eine Wertschöpfung von 20,8 Mrd. € rein durch die Anwendung der Fügetechnik. Fügetechnologien im Allgemeinen sind für Deutschland von enormer Bedeutung und nehmen somit eine Schlüsselposition ein [DVS07, DVS12-5, Mid09].

Wie bereits erwähnt, ist die aktuelle Marktsituation von einem enormen Kostendruck geprägt, dem vor allem kleine und mittelständische Unternehmen ausgesetzt sind. Damit ein Unternehmen weiter am Markt bestehen kann, sind permanente Weiterentwicklungen der Produkte und immer effizientere Fertigungsverfahren die Grundvoraussetzung. Konkurrenzfähigkeit gelingt nur, wenn aktuellen Trends, allem voran der Ressourcenschonung, der fortlaufenden Senkung der Fertigungskosten und der Umsetzung neuer ökonomischer und ökologischer Ansätze, Rechnung getragen wird [DVS07, DVS12-5].

Die bereits zitierte Studie des DVS hat ergeben, dass von den befragten Unternehmen die zentralen Herausforderungen bezüglich Fügeprozessen vor allem im Bereich der Fügbarkeit neuartiger Werkstoffe, der Automatisierung und der Online-Qualitätssicherung gesehen werden [DVS12-5].

Eine Aufschlüsselung des Forschungsbedarfs nach Fügeprozessen (Kleben, Schweißen, Fügen durch Urformen, Fügen durch Umformen und mechanisch) verdeutlicht, dass der in Zukunft größte Forschungsbedarf im Bereich der Online-Qualitätssicherungsmaßnahmen für Fügeprozesse, wie Schweißen und Kleben, besteht, gefolgt von der Erweiterung des Spektrums fügbarer Werkstoffe und der Automatisierung von Fügeprozessen [DVS12-5].

In einer offenen Frage zum Forschungsbedarf hinsichtlich der Fügeprozesse wurde von 17,5% der Befragten explizit die Online-Qualitätssicherung als wichtigste Thematik genannt, sich aktuellen Herausforderungen zu stellen [DVS12-5].

### 1.3. Einsatzgebiete Heizelementstumpfschweißen von Kunststoffen

Das Heizelementstumpfschweißen (HS) stellt ein Schweißverfahren mit hohen Standards [Nat92] und einer nahezu uneingeschränkten Vielfalt an schweißbaren Produkten dar. Einen kleinen Blick in das Produktportfolio der Maschinenhersteller zeigt, wie flexibel das Heizelementstumpfschweißen zum Einsatz kommen kann. Beispielsweise bietet die Fa. WIDOS Wilhelm Dommer Söhne GmbH standardmäßig Schweißmaschinen für den Rohrleitungsbau für einen Rohraußendurchmesser von 50mm bis 2600mm an [WID13]. Die Fa. Biomatik Leuze GmbH wirbt mit einem internen Rekord, bei dem bis zu 34 Teile mit Hilfe des Heizelementstumpfschweißens gleichzeitig miteinander zu einem Kraftstofftank verbunden wurden. Weiterhin wird auf erfolgreich laufende Anlagen für Produkte im Automobilbereich (Interieur- und Exterieurkomponenten (Mittelkonsole, Rückleuten, Behälter), im Under-the-Hood-Bereich (Batterien, Luft-Ansaugrohre)) und im Non-Automobilbereich (Paletten, Wärmetauscher, Einspühlbehälter und Behälter für Waschmaschinen, Geschirrspüler und Dampfbügelautomaten) hingewiesen [Bie13]. Ebenso könnten unzählige Beispiele aus dem Bereich Medizintechnik, Spielwaren, Elektrotechnik, Elektronik, Verpackung und Sportartikel angeführt werden [3Pi13].

Kunststofffenster als weiteres Beispiel, werden sogar nahezu ausschließlich mit dem Verfahren Heizelementstumpfschweißen hergestellt. Im Jahr 2010 wurden 56% aller in Deutschland produzierten Fenstereinheiten aus Kunststoff hergestellt. Hierbei handelte es sich um sieben Millionen Fenstereinheiten. Wird berücksichtigt, dass ein Kunststofffenster aus Rahmen und Flügereinheit besteht und beide mit je vier Schweißungen aus Halbzeugen hergestellt werden, sind acht Schweißungen pro Fenstereinheit und somit 56 Millionen Schweißungen mit dem Heizelementstumpfschweißen im Jahr 2010 zur Fensterherstellung durchgeführt worden [Pro10].

### 1.4. Motivation

Die kunststoffverarbeitende Industrie muss sich im 21. Jahrhundert mannigfaltigen Herausforderungen stellen. Während globale Megatrends wie der demographische Wandel, das Bevölkerungswachstum sowie die Globalisierung und Urbanisierung sich nur indirekt auf die kunststoffverarbeitende Industrie auswirken, haben der Klimawandel, die Energieverknappung sowie der beschleunigte technologische Fortschritt unmittelbar Folgen auf das Handeln von Industrieunternehmen. Vor allem kleine und mittelständische Unternehmen erfahren stark belastende Mehrausgaben für Rohstoffe, aber auch Personal- und Energiekosten [Kru13]. Hinzukommt, dass vor allem die immer kurzfristigeren und stärkeren Rohstoffpreisschwankungen sowie Überkapazitäten bei gleichzeitig ausgeprägten Wettbewerbssituationen stark belastend auf die Unternehmen wirken.

Das Heizelementstumpfschweißen stellt ein universell einsetzbares und hochautomatisierbares Fügeverfahren dar. Es lassen sich eine Vielzahl von Produktgeometrien (Formteile sowie Halbzeuge) und Materialien reproduzierbar und mit hoher Nahtqualität verbinden. Dank der langen Entwicklungsgeschichte, der daraus resultierenden Zuverlässigkeit und erreichbaren Nahtqualität, nimmt dieses Verfahren eine Zentralstellung in der Kunststoffindustrie ein. Es wird sowohl im Bereich der Einzel- als auch Großserienfertigung sehr erfolgreich eingesetzt [Ehr04, Pie75].

Herausforderungen bestehen allerdings darin, dass bislang kaum oder keine Möglichkeiten existieren, Online- und vor allem auch Inline-Qualitätssicherungsmaßen für dieses Schweißverfahren zu ergreifen, mit denen es den zukunftsorientierten Anforderungen des Marktes gerecht wird. Die derzeit zum Einsatz kommenden Sensortechnologien, bestehend aus primär Kraft- und Wegsensoren für die Fügeschlitten sowie einem Thermoelement im Heizelement, entsprechen zwar dem Stand der Technik und tragen im Grunde zur Reproduzierbarkeit und Dokumentierbarkeit der Prozessabfolgen bei, allerdings sind aktuell zum Einsatz kommende Sensoren nur stark eingeschränkt geeignet, qualitätsrelevante Aussagen bezüglich der eigentlichen Erwärmung der Fügepartner zu liefern. Obwohl die Wärmetransportphänomene, sprich die Wärmeleitung zwischen Heizelement und Kunststoff, einer der zentralen qualitätsbestimmenden Vorgänge beim Heizelementstumpfschweiß-

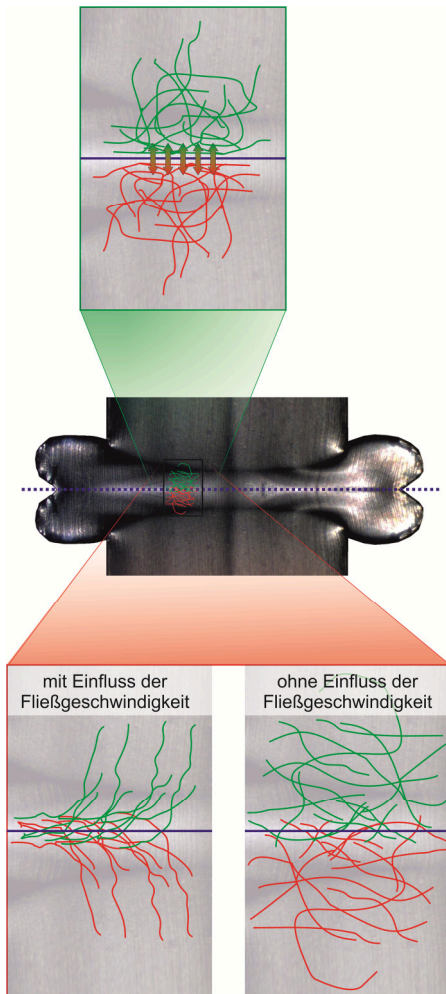
prozess ist, kann dieser Vorgang bislang nicht direkt messtechnisch erfasst und ausgewertet werden. Aus diesem Grund setzte sich diese Arbeit den Schwerpunkt, aufbauend auf dem Stand der Wissenschaft, eine Wärmestrombilanzierung zu realisieren und deren Eignung für eine Inline-Qualitätssicherung zu bewerten. Der Einsatz von hochtemperaturbeständigen Wärmestromsensoren auf dem Heizelement soll erstmals die Möglichkeit bieten, unkompliziert, schnell, zuverlässig und direkt in der Fügezone einen Messwert zu generieren, der direkt mit Wärmetransportphänomenen während der Plastifizierung verknüpft ist. Die Schaffung einer Inline-Wärmestrombilanzierung soll als Inline-Qualitätssicherung das Heizelementstumpfschweißverfahren wissenschaftlich fundiert und zukunftsorientiert weiterentwickeln. Diese Maßnahme soll dem Verfahren Heizelementstumpfschweißen zu weniger Ausschuss, einem effizienteren Umgang mit Ressourcen und höheren Stückzahlen in der Produktion verhelfen. Eine teil- und vollautomatisierbare Qualitätssicherung realisiert Kostenminimierungen bei gleichzeitiger Steigerung der Wirtschaftlichkeit und Bauteilqualität. Nur so wäre der Grundstein dafür gelegt, dass Fügeverfahren wie das Heizelementstumpfschweißen weiterhin Schlüsseltechnologien in Deutschland bleiben und sich mit innovativen Fügetechnologien nachhaltige und sowohl ökologisch als auch ökonomisch optimierte Produkte herstellen lassen.

## 2. Stand der Wissenschaft

### 2.1. Verbindungsmechanismen und Qualitätskriterien beim Heizelementstumpfschweißen von Kunststoffen

#### 2.1.1. Verbindungsmechanismus

Der Verbindungsmechanismus beim Heizelementstumpfschweißen basiert in erster Linie auf Adhäsionseffekten, d.h. auf atomaren bzw. molekularen



**Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung  
des Verbindungsmechanismus bei  
Heizelementstumpfschweißen  
(oben: molekulare Wechselwirkungen;  
unten: mechanisches Verklammern und  
Verschlaufen der Moleküle)**

Wechselwirkungen der in Kontakt gebrachten Grenzschichten [Pot04]. Grundsätzlich kann die Adhäsion in drei Hauptgruppen unterteilt werden, die chemische Adhäsion, die physikalische Adhäsion und die mechanische Adhäsion. Im nachfolgenden sollen nicht alle denkbar möglichen Arten und Theorien der Adhäsion beschrieben werden sondern nur ausgewählte Modelle zur Verdeutlichung des Verbindungsmechanismus beim Heizelementstumpfschweißen. Abbildung 1 zeigt stark vereinfacht die wesentlichen Verbindungsmechanismen beim Heizelementstumpfschweißen. Der obere Teil der Abbildung zeigt die molekularen Wechselwirkungen, die zwischen den in Kontakt gebrachten Grenzschichten entstehen (chemische Adhäsion, physikalische Adhäsion). Diese verursachen meist eine spontane Haftung infolge des Kontakts, tragen aber nur zu einem geringeren Prozentsatz zur möglichen Verbundfestigkeit bei. Der untere

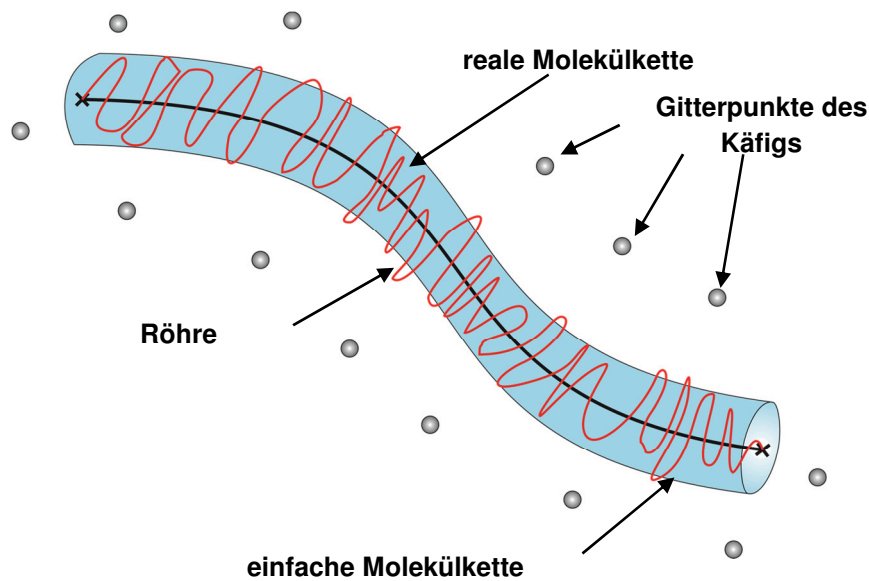
Teil der Abbildung zeigt die in deutlich höherem Maße festigkeitsbringenden Mechanismen, das mechanische Verklammern (mechanische Adhäsion) und

das Verschlaufen der Molekülketten (Diffusion) in der Nähe der Grenzfläche durch Selbstdiffusion und das Verschlaufen der Moleküle in Folge von Molekülverstreckungen und Relaxationen sowie die damit verbundenen Platzwechselvorgänge [Pot04].

Ein weiterer Effekt, der die Verbindungsfestigkeit stark beeinflussen kann ist die Tatsache, dass beim Heizelementstumpfschweißen zwei Schmelzen aufeinandertreffen und, wie in der Abbildung 1 dargestellt, eine Fließgeschwindigkeit zusätzliche Verschlaufungen begünstigen kann. Ein gutes Modell zur Vorstellung des Verbindungsmechanismus in Schmelzen liefern sowohl das nachfolgend beschriebene Reptationsmodell [Brie98, Cas00, Kes07, Püt99, Tra94] als auch die Beschreibung von Platzwechselvorgängen aufgrund von Molekülverstreckung und Relaxation [Ehr07, Kle01, Wra14].

### 2.1.1.1. Reptationsmodell

Der Nobelpreisträger Pierre-Gilles de Gennes erkannte 1971 als erster, dass in einer Polymerschmelze Kettenmoleküle heillos ineinander verknäult sind und eine gewöhnliche Diffusion nicht möglich ist. Um dennoch die besonderen Fließeigenschaften von Polymerschmelzen erklären und deuten zu können, hat er das sogenannte Reptationsmodell (lateinisch reptare = kriechen) entwickelt. Demnach befindet sich jede Polymerkette in einer Röhre innerhalb eines Geflechts gefangen und kann sich nur schlangenartig durch diesen Kanal winden, indem das Molekül seiner eigenen Kontur folgt und mit der Spitze in vorhandene oder sich öffnende Lücken vorstößt. [Cas00, Kes07, Püt99, Tra94] Abbildung 2 zeigt das Doi-Edwards-Modell zur Verdeutlichung einer einfachen und einer realen Polymerkette.



**Abbildung 2: Doi-Edwards-Modell zur Veranschaulichung einer einfachen und einer realen Polymerkette zur Beschreibung des Reptationsmodells [Doi86]**

Abbildung 2 zeigt eine reale Molekülkette innerhalb einer Röhre. Die Röhre repräsentiert den Freiraum eines Moleküls innerhalb eines Polymernetzwerks, begrenzt durch entsprechende benachbarte Moleküle. Das einfache Molekül erleichtert die Vorstellung der Polymerkette und soll im nachfolgenden zur weiteren Erläuterung des Reptationsmodells dienen. Abbildung 2 zeigt das Reptationsmodell einer Polymerkette in einer verschlauften Schmelze zu verschiedenen Zeiten. Zum Zeitpunkt  $t = 0$  befindet sich die Kette (Vollinie innerhalb der Röhre) in der beschriebenen Ausgangsposition (dargestellte Röhre). De Gennes geht davon aus, dass das Molekül zu diesem Zeitpunkt innerhalb seiner Röhre in beide Richtungen Brown'sche Molekularbewegungen ausführt. Diese Bewegung wird als Grund dafür gesehen, dass die freien Kettenenden des Moleküls zum Zeitpunkt  $t = t_1$  zunehmend die Bindung, sprich die Erinnerung, an die räumliche Ausrichtung der Röhre in diesem Bereich verlieren. Dargestellt ist dies anhand der Tatsache, dass das Molekül lokal seine Röhre verlassen hat und zum Zeitpunkt  $t = t_1$  ein freies Kettenende gezeigt ist. Befindet sich das Netzwerk weiterhin im Schmelzezustand, so verlassen zunehmend mehr Kettensegmente die ursprüngliche räumliche Ordnung (Zeitpunkt  $t = t_2$ ). Der Zeitpunkt, an dem das Molekül vollständig seine Röhre verlassen hat wird als Reptationszeit  $t_r$  bezeichnet [Cas00, Kes07, Püt99].



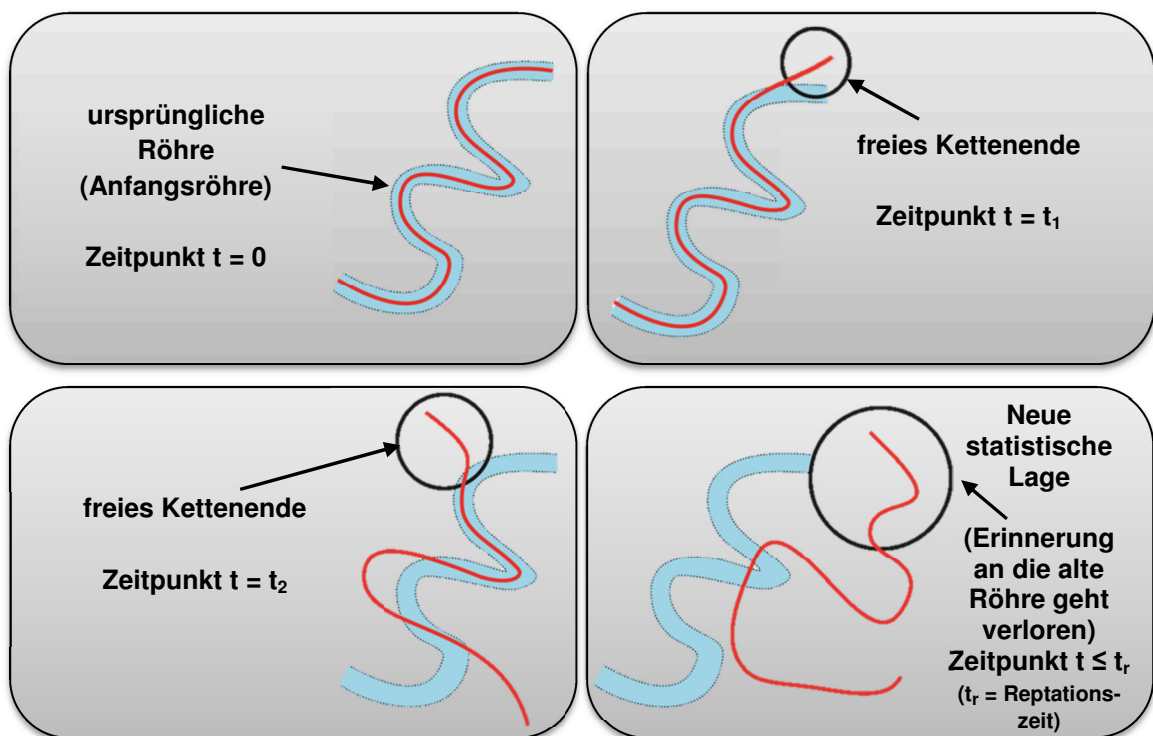
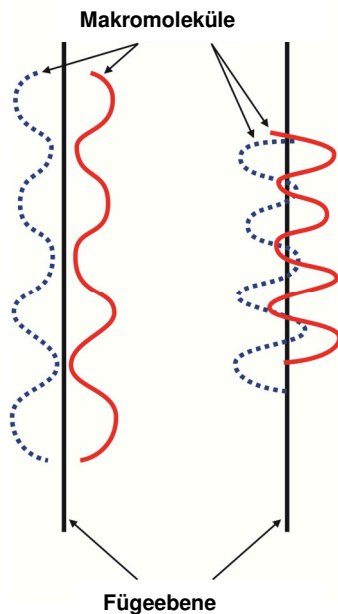


Abbildung 3: Reptationsmodell einer Polymerkette in einer verschlauteten Polymerschmelze ( $0 < t_1 < t_2 \leq t_r$ ) [Doi86]

Das Kettenende, welches die ursprüngliche Röhre verlassen hat, wird von Wool [Woo89] als „Kleinkette“ bezeichnet und deshalb auch als zufällig gewundene Kette dargestellt, die der Gauß'schen Statistik gehorcht. D.h. die beschriebenen Kettenenden folgen bzgl. ihrer Anordnung einer Gauß-Verteilung. Die in Abbildung 2 dargestellten Kreise sollen die räumliche Umhüllung der Kettensegmente / Kleinketten darstellen und bilden den Aufenthaltsraum für diese. Liegt ein weiteres Bauteil innerhalb des Kreises und befindet sich ebenso im Schmelzezustand, wie beim Heizelementstumpfschweißen, so ist ein Eindiffundieren der oberflächennahen Kleinketten in das benachbarte Bauteil möglich [Cas00, Kes07, Püt99]. Diese Verschlaufungen bilden einen starken Material- / Bauteilverbund.

### 2.1.1.2. Platzwechselvorgänge auf Grund der Molekülver Streckung und Relaxation

Da beim Schweißen bekannt ist, dass vor allem in der Fügephase ein nahezu druckloses Berühren der Oberflächen nicht ausreicht, sondern aktiv mit einem Fügedruck gearbeitet werden muss, scheint das Reptationsmodell zur Beschreibung der Verbundfestigkeit nicht auszureichen [Ehr07, Kle01, Wra14]. Eine Möglichkeit, das Generieren einer hohen Verbundfestigkeit zu beschreiben, ist die Beschreibung von Platzwechselvorgängen auf Grund der Molekülver Streckung und anschließenden Relaxation.



**Abbildung 4:**  
Makromoleküle  
gestreckt in Folge der  
Dehnströmung (links), re-  
laxiert nach dem Fügen  
(rechts) [Doi86]

Diese Platzwechselvorgänge veranschaulichen sehr einfach den Zusammenhang Fügedruck, Schweißwulstbildung und Verbundfestigkeit. Die Bewegung der Schmelze in diesem Prozessschritt wird in der für das Heizelementstumpfschweißen beschreibenden Literatur als Fließgeschwindigkeit in der Fügephase bezeichnet. Die Fließgeschwindigkeit bezieht sich auf die Geschwindigkeit des plastifizierten Materials parallel zur Fügeebene und tritt infolge eines Quetschfließens beim Heizelementstumpfschweißen auf. Das Quetschfließen ist verantwortlich für eine lokal auftretende Dehnströmung, die im Bereich der Fügezonen auf die Makromoleküle wirkt. Die Makromoleküle werden parallel zur Fügeebene ver Streckt so lange ein Quetschfließen vorherrscht. Erreichen die Fügepartner ihre endgültige Fügeposition, verringert sich die Relativbewegung und die Fügepartner kommen zum Stehen. Die Quetschfließbewegung verringert sich äquivalent und somit auch die Dehnströmung. Die Moleküle beginnen im weiteren Verlauf der Dehnung entgegenzuwirken, sprich zu Relaxieren und nehmen ihre ursprüngliche Position soweit möglich wieder ein. Die ausgeprägte Relaxation ermöglicht dann auch Platzwechselvorgänge durch die Grenzfläche hindurch, was der Verbundfestigkeit sehr zutragend ist. Erwartungsgemäß erfolgt diese Relaxation deutlich schneller als die im Reptationsmodell beschriebene Selbstdiffusion und trägt entscheidend zur Verbundfestigkeit bei.

Abbildung 4 zeigt die Verstreckung der Moleküle infolge der Dehnströmung (linke Darstellung Abbildung 4) und die bei der Relaxation nach dem Fügen geschaffene Molekülstruktur (rechte Darstellung Abbildung 4) [Ehr07, Kle01, Wra14].

### 2.1.2. Qualitätskriterien beim Heizelementstumpfschweißen

Die Definition der Qualität der Schweißverbindung kann über eine Vielzahl von Kriterien erfolgen. Eine klassische Definition erfolgt über das Verhältnis aus mechanischem Kennwert der Schweißverbindung ins Verhältnis gesetzt zum gleichen mechanischen Kennwert des Grundmaterials identischer Geometrie. Das Verhältnis dieser Werte ist bekannt als Schweißfaktor. Ein Schweißfaktor von 0,9 besagt, dass die Festigkeit der Schweißung im Bereich der Verbindungsstelle 90% der Grundmaterialfestigkeit entspricht. Welcher mechanische Kennwert der Verhältnisbildung zu Grunde gelegt wird, ist anwendungsbezogen. Weit verbreitet ist der Kurzzeitzugschweißfaktor. Hier wurden Kurzzeitzug-Festigkeitswerte einer geschweißten und einer ungeschweißten Probe ins Verhältnis gesetzt. Äquivalent ist dies beim Schweißfaktor bezogen auf den Biegewinkel. Hier wurden die Biegewinkel ins Verhältnis gesetzt. Allerdings existieren noch weitere Möglichkeiten, die Qualität der Schweißfaktoren zu bestimmen, beispielsweise über die Definition, dass die Schweißwulst nicht sichtbar sein darf, eine Dichtheit gewährleistet sein muss oder die Schweißnaht keinen Bauteilverzug hervorrufen darf. Alle diese Kriterien sind möglich und werden in der Praxis beliebig kombiniert. Wenn nichts anderes angegeben ist, beziehen sich die angegebenen Prüfungen auf Kurzzeitzugfestigkeitskennwerte.

### 2.1.3. Zwischenfazit Verbindungsmechanismen und Qualitätskriterien beim Heizelementstumpfschweißen von Kunststoffen

Der Verbindungsmechanismus bei Kunststoffen und im speziellen Kunststoffschmelzen basiert in erster Linie auf Adhäsionseffekten. Erläuterungen bedienen sich zwischenmolekularer und zwischenatomarer Wechselwirkungen, thermodynamischer Betrachtungen der Oberfläche, Diffusionstheorien und Ähnlichem.

## 2. Stand der Wissenschaft

---

Zwei ausgewählte und anerkannte Methoden wurden in den Kapiteln 2.1.1.1 und 2.1.1.2 erläutert. Es handelte sich um das Repationsmodell sowie die Erläuterung von Platzwechselvorgängen auf Grund der Molekülver Streckung und Relaxation. Industrielle Anstrengungen verfolgen meist das Ziel, in möglichst kurzer Zeit möglichst hohe Festigkeiten zu generieren, was aber meist bedeutet, keinen Schweißfaktor von 1,0 zu erreichen. Grund hierfür ist, dass in der Praxis keine Zeit ist, die Parameter soweit zu optimieren, dass ein hoher Schweißfaktor erreicht wird, nicht das Know-How innerhalb der Firma zur Verfügung steht oder bewusst Schweißparameter gewählt werden, die eine ausreichende Festigkeiten bei gleichzeitig kurzer Zykluszeit und hoher Wirtschaftlichkeit des Prozesses zulassen. Gerade deshalb steht zum einen die Reproduzierbarkeit der Prozesse im Vordergrund aber auch das Verständnis und die Möglichkeit Parameter im Hinblick auf Festigkeit, Optik, Zykluszeit, etc. zu korrelieren und gezielt zu steuern.

Grundlegend reproduzierbar und dokumentierbar sind die Prozessabfolgen der Schweißmaschine und speziell die Bewegungs- und Temperaturführung innerhalb des Schweißprozesses dank aktuell verbauter Steuerungen und Sensoren. Allerdings berücksichtigen aktuelle Sensoren nur die Bewegungsabfolgen und prozessspezifischen Kennwerte, sprich zeitliche und räumliche Bewegungen der Fügeschlitten und des Heizelements. Sensortechnisch nicht erfasst wird die Fügezone selbst, in der die Verbundfestigkeit entsteht und die eigentlichen Verbindungsmechanismen vorherrschen. Es existieren zwar theoretische Ansätze, die diesen Bereich versuchen zu beschreiben, allerdings bleibt dies abstrakt, solange nicht die notwendige Sensortechnologie und Methodik zur realen Bestimmung und Verarbeitung existiert. Der Einsatz der Wärmestrombilanzierung und die entsprechende Methodik zur Interpretation der neu gewonnen Signale im Bereich der Verbindungsstelle soll dem Heizelementstumpfschweißen neue Impulse verleihen. Nicht nur der Prozess sondern vor allem die Verbundfestigkeit soll erstmals reproduzierbarer, dokumentierbarer und gezielt einstellbar sein.

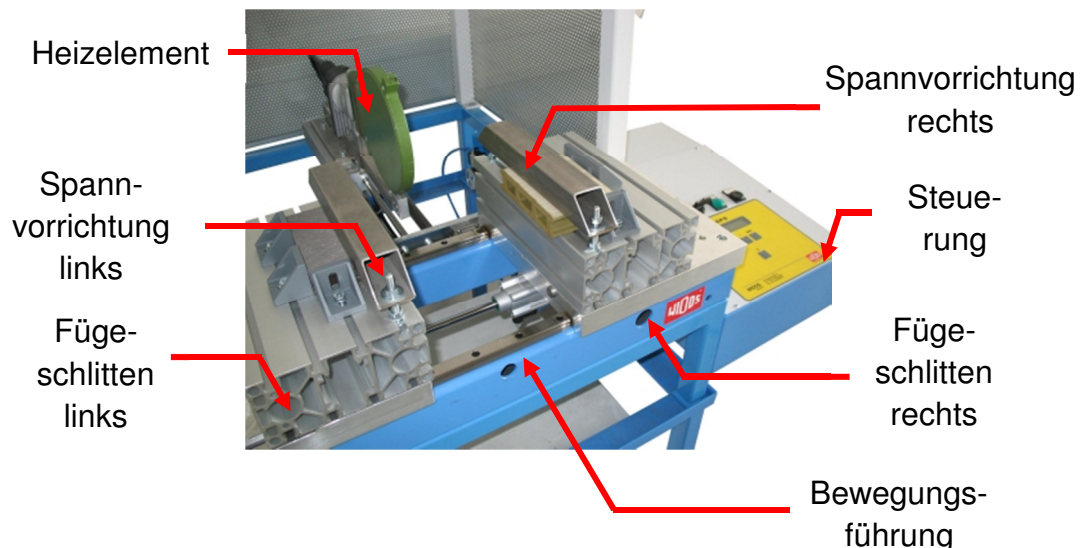
## 2.2. Heizelementstumpfschweißen

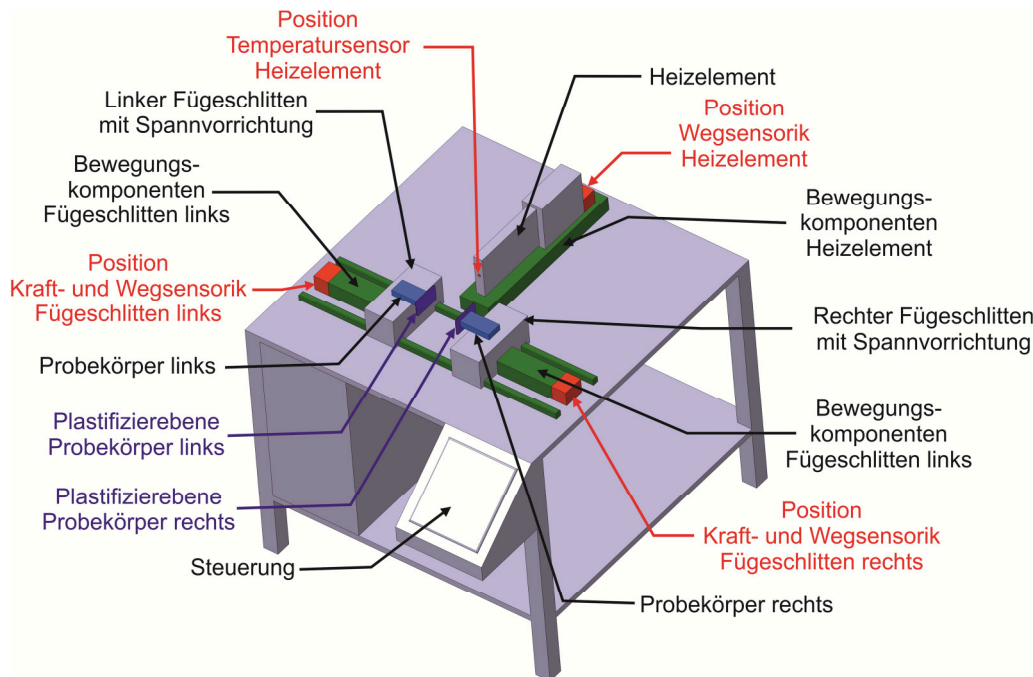
### 2.2.1. Verfahrensbeschreibung und Parameterauswahl bzw.

#### Prozessoptimierung

Das Heizelementstumpfschweißen selbst stellt eines der ältesten mechanisierten Verfahren zum Verbinden von Kunststoffen mit Hilfe eines Schweißverfahrens dar. Erstmals wurde das Verfahren 1933 erwähnt. Die industrielle Umsetzung erfolgte bereits nach 1945. Maschinen mit automatisiertem Prozessablauf waren schon in den 60er Jahren verfügbar [DKM12, DVS12-1, Ehr04]. Das Heizelementstumpfschweißen stellt ein sehr vielseitiges Fügeverfahren mit einer nahezu uneingeschränkten Vielfalt an schweißbaren Produktgeometrien dar. Es verdankt seine Popularität einer zuverlässigen und gleichzeitig hohen Nahtqualität [Ehr04, Pie75].

Abbildung 5 zeigt im oberen Bereich der Abbildung exemplarisch eine Heizelementstumpfschweißapparatur der Fa. WIDOS Wilhelm Dommer Söhne GmbH. Die wichtigsten grundlegenden Komponenten sind das Heizelement, die Spannvorrichtung, die Bewegungsführung sowie die Steuerung. Im unteren Bereich ist schematisch dargestellt, an welchen Positionen in der Schweißmaschine die entsprechende Sensortechnik zur Einstellung und Überwachung von Schweißparametern zu finden ist.





**Abbildung 5: Heizelementstumpfschweißapparat für Platten der Fa. WIDOS Wilhelm Dommer Söhne GmbH (oben), Prinzip-darstellung einer Schweißapparat zur Verdeutlichung der Einbaupositionen aktueller Sensortechnologie**

Die grundlegenden Schritte des Heizelementstumpfschweißens sind das An-gleichen (AG), das Anwärmen (AW), das Umstellen (U) und das Fügen (F) bzw. das Abkühlen. Abbildung 6 zeigt einen Druck- und Wegverlauf als Funk-tion der Schweißzeit.

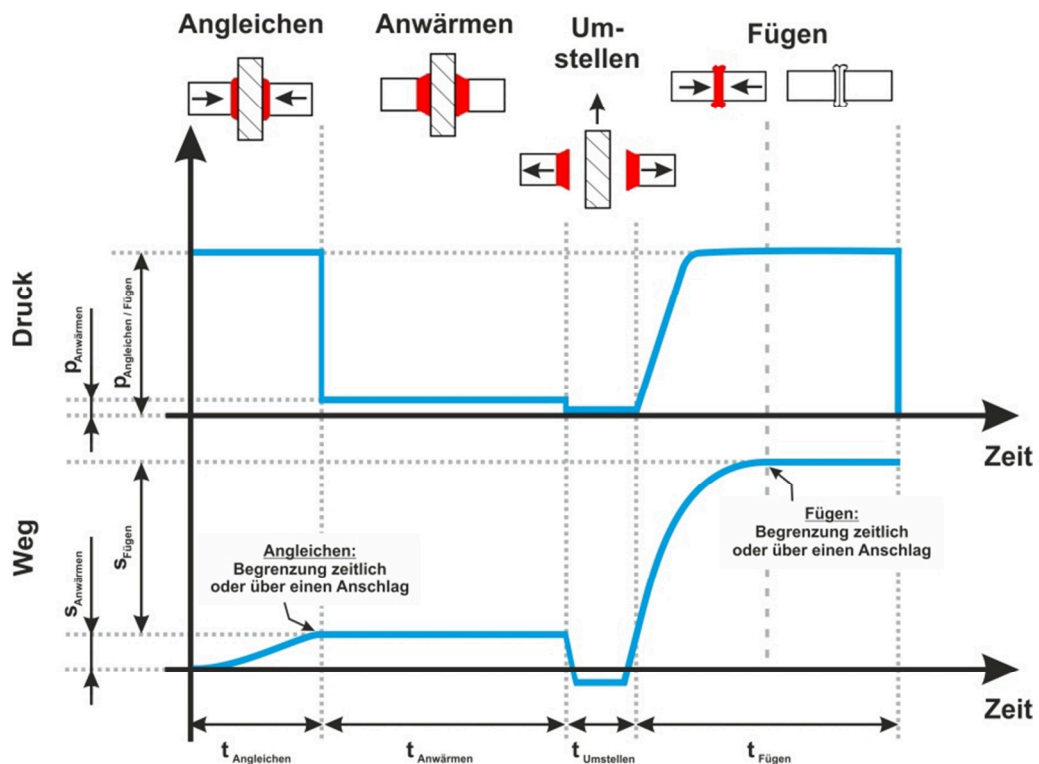


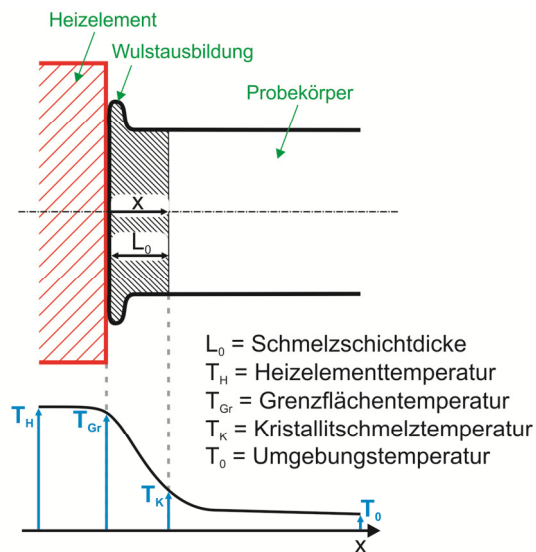
Abbildung 6: Druck- (oben) und Wegverlauf (unten)  
als Funktion der Schweißzeit beim Heizelementstumpfschweißen  
[DVS10, angepasst]

Das Angleichen beschreibt nach dem Spannen der Teile den ersten eigentlichen Prozessschritt auf dem Weg zur Schweißverbindung. Die zu fügenden Flächen der Bauteile werden hierzu am Heizelement unter definiertem Druck angeglichen, bis diese vollflächig am Heizelement anliegen. Dies ist erreicht, wenn sich am gesamten Bauteilumfang ein deutlich sichtbarer Wulst gebildet hat. Das Ziel des Angleichens besteht darin, Unebenheiten im Bereich der Fügezone, die in Ur- (Extrudieren, Spritzgießen, etc.) / Umformprozessen (Thermoformprozesse) oder Präparationsschritten (Sägen, Fräsen, etc.) entstanden sind, durch Abschmelzen zu beseitigen. Das Angleichen wird durch einen (ersten) Anschlag (weggesteuerter Prozess) oder über eine Angleichzeit (zeitgesteuerter / kraftgesteuerter Prozess) festgelegt.



## 2. Stand der Wissenschaft

Nach dem Angleichen erfolgt unmittelbar das Anwärmen der Fügeflächen. Dieser Schritt hat zum Ziel, die Verbindungsflächen auf Schweißtemperatur zu erwärmen und eine genügend dicke Schmelzschicht zu bilden. Der Übergang von der Kunststoffschmelze zum Feststoff ist dadurch gekennzeichnet, dass an dieser Stelle die Fließtemperatur  $T_f$  vorliegt. Die Fließtemperatur entspricht bei teilkristallinen Materialien der Kristallschmelztemperatur  $T_K$  und bei amorphen Materialien der Glasübergangstemperatur  $T_G$ . Die sich einstellende Temperatur zwischen Kunststoff und Heizelement wird als Grenzflächentemperatur  $T_{Gr}$  bezeichnet (siehe Abbildung 7) [Tap89, Nat92]. Der Anwärmvorgang wird in der Regel zeitabhängig gesteuert, wobei der Druck an den Fügeflächen auf nahezu Null reduziert wird. Ein geringer Restdruck wird in erster Linie durch die thermische Ausdehnung der zu schweißenden Materialien aufgebaut und ist für die Wärmeleitung in die zu fügenden Kunststoffbauteile erforderlich.



**Abbildung 7: Temperaturverlauf  
beim Heizelementstumpfschweißen  
und Definition der Schmelzschichtdicke  
sowie weiterer relevanter  
Temperaturkenngrößen [Pot04]**

Nach Ablauf der Anwärmzeit werden die Bauteile vom Heizelement gelöst und das Heizelement aus der Schweißebene entfernt (Umstellen). Die Umstellzeit wird so kurz wie möglich gehalten. Richtlinien (vor allem die des DVS) geben für viele Kunststoffe richtungsweisende Angabe zur maximalen Umstellzeit. An dieser Stelle sei auf die einschlägige Literatur verwiesen. [DVS10, Kle09, Kra08-1, Kra08-2, Kra12-1, Kra12-2, Pot04, Sch12, Sch12a, Sch12b, Tap89]



Unmittelbar nach dem Umstellen schließt sich das Fügen der Bauteile an, bei dem die zu verbindenden Flächen unter definiertem Fügedruck zusammengepresst werden. Der Fügeweg ist in aller Regel ebenfalls durch einen (zweiten) Anschlag oder zeitlich begrenzt (siehe Abbildung 6), um zu verhindern, dass das vorher erwärmte bzw. geschmolzene Material sich zu stark aus der Fügezone drückt und somit ein Schweißen der „kälteren“ Materialgebiete erfolgt. Die Abkühlzeit ist anschließend so zu wählen, dass die Schweißnaht ausreichend abgekühlt ist, um die Bauteile ohne Schädigung aus der Maschine entfernen zu können und das Heizelement wieder auf Betriebstemperatur ist. Der Fügedruck wird unter Berücksichtigung der Schmelzviskosität des Materials und der Fügeflächengeometrie so gewählt, dass im Falle eines anschlaggesteuerten Prozesses der zweite Anschlag erst gegen Ende der Fügezeit erreicht wird. Denn nach Erreichen des zweiten Anschlags reduziert sich der Fügedruck in der Fügezone und nimmt infolge des Abkühlvorgangs weiter ab. [DVS10, Kle09, Kra08-1, Kra08-2, Kra12-1, Kra12-2, Pot04, Sch12, Sch12a, Sch12b, Tap89]

### 2.2.2. Taxonomie der Prozessanalysen

Prozessanalysen und entsprechende Prozessregelungen, -steuerungen und -überwachungen sind die Grundlage für eine reibungslose Produktion und gewinnorientierte qualitativ hochwertige Fertigung mit möglichst geringem Ausschuss. Die Taxonomie der Prozessanalytik verdeutlicht, welche Nähe die für den jeweiligen Prozess genutzte Prozessanalyse zum eigentlichen Prozess hat. Zur Beschreibung haben sich Begriffe wie offline, atline, online und inline etabliert. Sie beinhalten unmittelbar Aussagen darüber, mit welcher Totzeit bei der Produktion zu rechnen ist. Totzeit ist bei dieser Thematik die Zeit, die zwischen der Probenentnahme und dem Vorliegen der Analyseergebnisse für die untersuchte Probe vergeht. Je länger diese Zeit ist, desto schwieriger ist es, hieraus Rückschlüsse für die aktuelle Fertigung abzuleiten [Hoc11, Met13]. Abbildung 8 stellt die Offline-, Atline-, Online-, und Inline-Analysemethoden grafisch der Totzeit und der Eignung zur Prozessregelung und Ausschussminimierung gegenüber. Tabelle 1 erläutert im Anschluss kurz die zentralen Merkmale der Analysemethoden und führt konkrete Beispiele an, in welcher Form die Analysemethoden beim Heizelementstumpfschweißen zum Einsatz kommen.

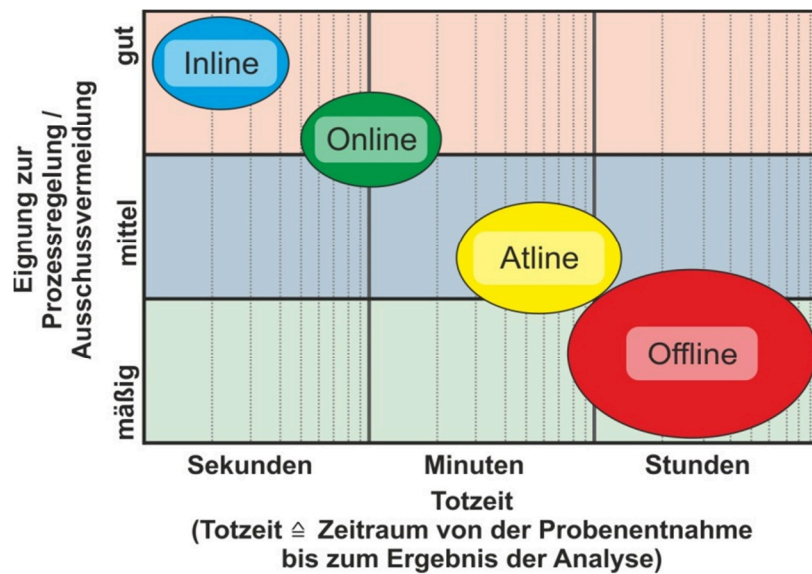


Abbildung 8: Einordnung von Offline-, Atline-, Online und Inline-Analysemethoden bzgl. ihrer Totzeit

(Totzeit  $\triangleq$  Zeitraum zwischen Probenentnahme und fertigem Ergebnis der Analyse) und der resultierenden Eignung zur Prozessregelung und Ausschussminimierung [Hoc11]

Tabelle 1: Analysemethoden, deren Merkmale und Beispiele für das Heizelementstumpfschweißen [Hoc11, Kes06, Met13]

Art der Analyse-methode	Merkmale	Beispiel für das Heizelementstumpfschweißen
<b>Offline</b>	<p>Gezielte Probenentnahme und Transport der Probe zu einer Messeinrichtung oder einem Labor abseits der Produktionslinie.</p> <p><b>Vorteil:</b> Bei der klassischen Offline-Analyse handelt es sich um eine diskontinuierliche Messung, bei der in individuell festgelegten Zeiträumen Proben der Produktion entnommen werden. Die Proben werden ausgewählten Personen, Firmen oder Behörden übergeben, die über entsprechendes Expertenwissen verfügen und qualitativ hochwertige Analysen durchführen.</p>	<p>Beim Heizelementstumpfschweißen handelt es sich bei den meisten Prüfverfahren zur Bestimmung der Nahtqualität um Offline-Analysemethoden, da häufig aufwändige Probenpräparationen und Messabfolgen notwendig sind, um die Schweißnahtqualität bestimmen zu können. Hierzu zählen vor allem mechanische Analysen der Schweißnaht zur Bestimmung der Zugfestigkeit oder Biegesteifigkeit. Die Probenvorbereitung, Konditionie-</p>

	<p><b>Nachteil:</b> Die Totzeit ist in der Regel so groß, dass die erzielten Ergebnisse keine Prozesslenkung und -steuerung mehr zulassen.</p>	<p>rung und Prüfung dauert in aller Regel mehrere Stunden oder Tage.</p>
<b>Atline</b>	<p>Die Atline-Analysemethoden bedienen sich einer manuellen oder (halb-)automatisierten Probenentnahme und einer Messung dieser Proben im Umfeld der Produktion.</p> <p><b>Vorteil:</b> Die prozessnahe Anordnung der Messeinrichtung bedient sich leicht modifizierten Offline-Prüfverfahren und die Ergebnisse entstehen in Anlehnung an standardisierte und genormte Prüfverfahren.</p> <p><b>Nachteil:</b> Die genutzten Geräte befinden sich im Produktionsumfeld und müssen in vielen Fällen robuster ausgeführt sein als klassische Laborapparaturen. Auch besitzen diese Geräte meist geringe Geräteauslastungen, weil sie meist nur für diese Produktionslinie verwendet werden können und die Bedienung der Geräte erfolgt in aller Regel nur von in dieser Thematik angelerntem Personal.</p>	<p>Die Atline-Analysemethode beim Heizelementstumpfschweißen ist häufig dort angewandt, wo fertige Produkte Teststationen übergeben werden und beispielsweise halb- oder vollautomatisiert vermessen bzw. geprüft werden. Ein Beispiel sind geschweißte Behälter, die teil- oder vollautomatisiert entnommen und zu einer Messstation transportiert werden. Dort werden sie mit einem definierten Innendruck nahe dem Einsatzfall beaufschlagt und auf Leckagen getestet. Die Totzeiten sind in diesem Fall dennoch relativ lang, da ein Abkühlen des Bauteils sichergestellt werden muss, um Schädigungen durch den Versuch auszuschließen.</p>
<b>Online</b>	<p>Es werden permanent Teile oder Materialien dem Prozess entnommen, zeitnah analysiert und die Ergebnisse dieser Analyse fortlaufend mit den Prozessparametern der Fertigung korreliert.</p> <p><b>Vorteil:</b> Der Vorteil liegt in der meist starken Automatisierung der Probenentnahme und -prüfung. Es kann auf Grund der Totzeit eine direkte Prozesssteuerung, -überwachung und -regelung des Produktionsprozesses</p>	<p>Ähnlich dem Prozess der Atline-Analysemethode ist eine Online-Innendruckprüfung von Behältern. Im Falle einer Online-Analyse erfolgt diese Prüfung so schnell, dass Rückschlüsse auf die Produktion möglich sind und die Bauteile nicht zerstörend geprüft werden. Dies kann in diesem Beispiel über verminderte Prüfdrücke an noch warmen Bauteilen erfolgen. Es sind Unter</p>

## 2. Stand der Wissenschaft

---

realisiert werden.

**Nachteil:** Es handelt sich bei einer Online-Analysemethode um eine relativ kostenintensive Variante der Prozessanalyse, die oft spezielle Messsensoren und Prozessmessgeräte erfordert, die zudem aufwändig kalibriert werden müssen.

---

### Inline

Inlineanalysen (auch In-situ-Analysen bezeichnet) erfolgen direkt ohne gesonderte Probenentnahmen. Es werden direkt relevante Informationen über den Prozess und/oder das Produkt erlangt, indem Messstellen direkt im Produktionsstrom integriert sind und über erarbeitete Korrelationen Rückschlüsse auf qualitätsrelevante Eigenschaften des Endproduktes gezogen werden.

**Vorteil:** Resultate stehen in Echtzeit und vollkommen ohne Probenentnahmen zur Verfügung und können für eine gezielte Prozessregelung und -steuerung oder als Dokumentationsgrundlage verwendet werden.

**Nachteil:** Die Kalibrationen von Sensoren ist nochmals aufwendiger als bei Online-Analysemethoden. Es ist ein hohes Maß an Robustheit, Störunanfälligkeit und Langlebigkeit der Sensoren gefordert, da Wartungen an den Sensoren meist nur bei Produktionsstillstand durchgeführt werden können.

suchungen/Erfahrungen notwendig um auf kalte Bauteile und einsatznahe Prüfdrücke schließen zu können.

Bislang basieren alle Ansätze zur Inline-Analysemethode für das Heizelementstumpfschweißen auf konventionellen Kraft- und Wegmessungen im Bereich der Fügenschlitten sowie Temperaturmessungen im Heizelement. Diese Sensoren wurden primär dafür verbaut, um definierte Schweißparameter (Drücke, Zeiten und Heizelementtemperaturen) im Prozess zu generieren und sicherzustellen. Da jedoch keiner dieser Sensoren in der Lage ist, thermodynamische Vorgänge in der Fügezone direkt zu beschreiben, wurden für diese Sensoren eine Vielzahl teils theoretisch, teils empirisch erarbeiteter Zusammenhänge publiziert, um auf die Wärmetransportvorgänge zwischen Heizelement und Kunststoff schließen bzw. rechnen und daraus Qualitätssicherungsmaßnahmen ableiten zu können.

---

Abbildung 8 zeigt in Verbindung mit der Tabelle 1, dass für eine zufriedenstellende und vor allem effektive Prozessregelung und -steuerung eine Online- und noch besser Inline-Analysemethode herangezogen werden muss. Vor allem vor dem Hintergrund einer stetig steigenden Ressourcenverknappung und

einem immer stärker werdenden Preisdruck, erwachsen Forderungen nach effizienteren Produktionen und gesteigerten Produktqualitäten. Vor allem der Bereich Fügen von Kunststoffen und besonders das Heizelementstumpfschweißen kann sich diesem Hintergrund nicht entziehen und ist gezwungen, sich zunehmend der Thematik Online- und Inline-Überwachung zu widmen. Zumal Anwendern von Fügeprozessen immer häufiger bewusst wird, dass der Fügeschritt einer der letzten Schritte in der Produktionskette darstellt und diverse mehr oder minder kostenintensive Ur- und Umformschritte dem Fügeprozess vorangegangen sind und meist schon hochwertige, funktionelle und daher teure Bauteile vorliegen und weiterverarbeitet werden müssen.

Erste Ansätze für Online- und noch besser Inline-Analysetechniken für das Heizelementstumpfschweißen existieren, werden auf Grund mangelnder Transparenz der theoretischen Hintergründe, fehlender Sensortechnologie oder bedingt durch nicht zufriedenstellende Aussagekraft der Methoden häufig nicht konsequent eingesetzt. Recherchen haben gezeigt, dass sowohl Methoden als auch Sensoren im Schweißprozess fehlen, die die zentralen Prozessschritte inline überwachen können und den zentralen Kennwert, den Wärmetransport vom Heizelement in den Kunststoff, direkt detektierbar und verwertbar machen. Für bisherige Sensoren existieren zwar, wie bereits erwähnt und in den nachfolgenden Kapiteln näher erläutert, Theorien, wie von konventionellen Kennwerten, generiert aus Weg-, Kraft- und Temperatursensoren, auf die Wärmeübertragung vom Heizelement in den Kunststoff schließen lassen, jedoch werden diese auf Grund der hohen Komplexität in der Praxis meist nicht oder nur selten gewinnbringend eingesetzt. Wie eine solche Parameterfindung bzw. Prozessoptimierung beim Heizelementstumpfschweißen stattfinden kann, zeigt das nachfolgende Kapitel.

### 2.2.3. Grundsätze der Prozessauslegung für das Heizelementstumpfschweißen

Im nachfolgenden ist kurz der historische Hintergrund zur Entstehung aktueller Ansätze zur Eingrenzung eines möglichen Prozessfensters in der Praxis und zur Prozessoptimierung für das Heizelementstumpfschweißen dargestellt. Im Weiteren sind praxisrelevant die Ansätze für die jeweiligen Prozessphasen kurz erläutert.

#### 2.2.3.1. Grundlegende Bewertung

Abbildung 9 zeigt die geschichtliche Einordnung relevanter Entwicklungsstufen des Heizelementstumpfschweißens. Es wurde bereits sehr früh damit begonnen, Fügeprozesse wie das Heizelementstumpfschweißen zu entwickeln. Besonders die Arbeiten von Zöhren J., Pieschel D., De Zeeuw K., Michel H.J., Kreiter P., Michel P., Tappe P. und Natrop J. unter der Leitung von Potente H., Menges G. und Michaeli W. führten hauptsächlich in Aachen und Paderborn zu einer permanenten Weiterentwicklung des Heizelementstumpfschweißprozesses. Schritt für Schritt wurden, im Rahmen von diversen Arbeiten, meist praxisrelevante Herausforderungen bearbeitet und das Heizelementstumpfschweißen so weiterentwickelt und verschiedenste Einflussgrößen auf die Nahtqualität untersucht.

Die Ziele damaliger Anstrengungen waren wie heute auch, den Prozess immer besser kennen zu lernen und dahingehend zu optimieren, dass die geforderten Eigenschaften an die Qualität der Schweißverbindung möglichst schnell erreicht und gezielt eingestellt werden können. Anfänglich wurde beispielsweise der Standpunkt vertreten, dass die Fügephase besonders wichtig für die Entstehung der Nahtqualität sei, jedoch wurde später erkannt, dass die Angleich- und Anwärmeschritte ebenso wichtig sind, um die gewonnen Erkenntnisse in der Fügephase interpretieren und umsetzen zu können [Nat92, Tap89].

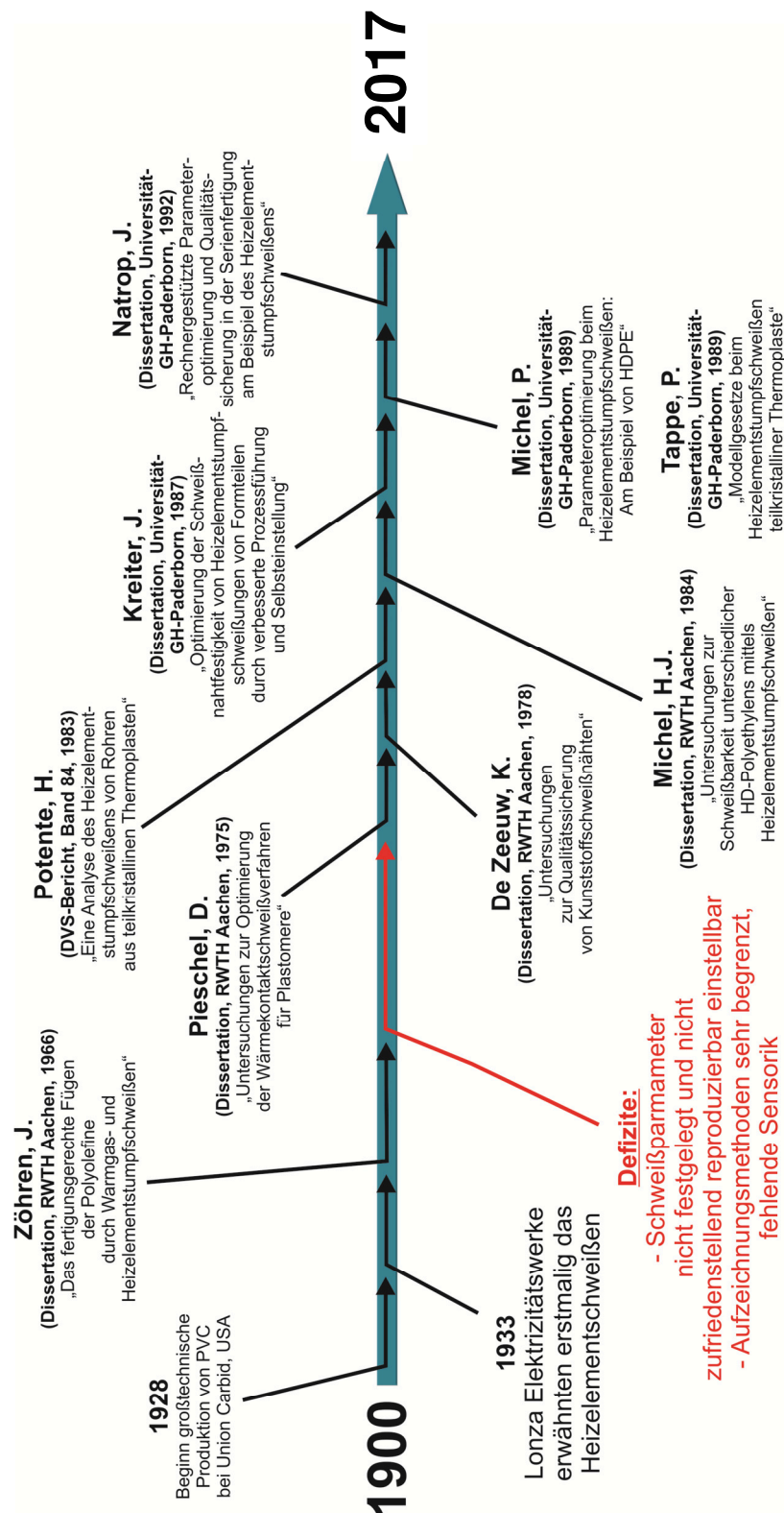


Abbildung 9: Geschichtliche Einordnung relevanter Entwicklungsstufen des Heizelementstumpfschweißens [3Pi13, DKM12, Ehr04, Gre03, Mic87, Nat92, Pie75, Pot77, Pot85, Tap89, Zee78, Zöh66]

## 2. Stand der Wissenschaft

---

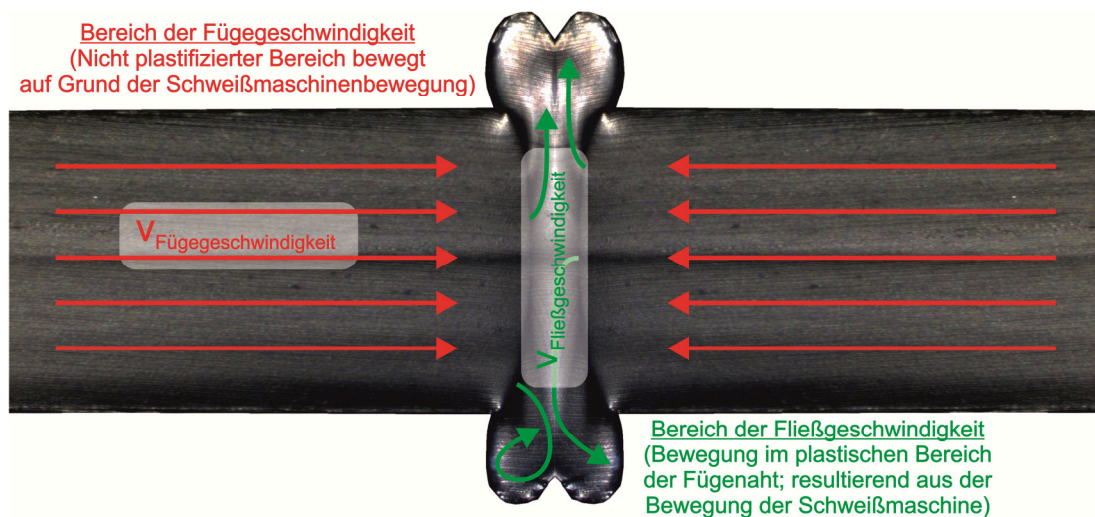
Bis in die 70er Jahre hinein bestanden die größten Defizite darin, die Maschinenparameter reproduzierbar einstellen zu können. Weiterhin fehlten Sensoren, die z.B. Kraft- und Wegverläufe zufriedenstellend aufzeichnen konnten. Diese Defizite wurden im Laufe der Entwicklung behoben und das Heizelementstumpfschweißen entsprechend weiterentwickelt.

Dank neuartiger Sensoriken im Schweißprozess zur Aufzeichnung der Kraft- und Wegverläufe veröffentlichte Pieschel bereits 1975 seine Dissertation mit dem Thema „Untersuchungen zur Optimierung der Wärmekontaktschweißverfahren für Plastomere“ [Pie75] und stellte erste mögliche mathematische Formulierungen der Erwärm- und Fließvorgänge vor. Auf Basis dieser Formulierungen zeigte Potente kurze Zeit später, dass in die mittlere Fließgeschwindigkeit der Fügephase alle wesentlichen Schweißparameter eingehen [Pot77]. Die Hypothese von Potente, dass bei vergleichbaren mittleren Fließgeschwindigkeiten (Geschwindigkeit, mit der sich die Schmelze im Bereich der Fügezone bewegt) des Materials vergleichbare Nahtqualitäten auch im Fügeschritt bei der Wulstausprägung vorherrschen, wurde somit bestätigt. Dieser Sachverhalt führte zur sogenannten Mindestfließgeschwindigkeit des Kunststoffmaterials während der Fügephase bei der Wulstausbildung. Die Mindestfließgeschwindigkeit beinhaltete, dass für eine zufriedenstellende Nahtqualität die Fügepartner im Fügeschritt nicht zu langsam zusammengepresst werden dürfen, weil sich dies negativ auf die Nahtqualität auswirkte. In den aktuellen Regelwerken sind deshalb sogenannte Druckaufbauzeiten vorgegeben, innerhalb derer der Druck in der Fügephase aufzubringen ist.

Diese Erkenntnisse nutzte De Zeeuw 1978 und erarbeitete Ansätze auf Basis der Fügegeschwindigkeit anstelle der Fließgeschwindigkeit. Die Fügegeschwindigkeit beschreibt in diesem Falle die Geschwindigkeit, mit der die zu verbindenden Bauteile von der Schweißmaschine auf einander zu bewegt werden, während die Fließgeschwindigkeit, wie bereits erläutert, die daraus resultierende Geschwindigkeit der Schmelze im Fügespalt darstellt. Der Unterschied zwischen Füge- und Fließgeschwindigkeit zeigt Abbildung 10. Er konnte nachweisen, dass die Schweißnahtqualität auch in Abhängigkeit von der Fügegeschwindigkeit ein Maximum durchläuft. Der wesentliche Fortschritt seiner Arbeit lag darin, dass die Fügegeschwindigkeit im Gegensatz zur Fließgeschwindigkeit von Potente mit Kraft- und Wegsensoren direkt messbar war.



Er nutzte also die Fügeschlittenbewegung anstelle der Bewegung der plastifizierten Materialbereiche und stellte ein Optimierungsverfahren auf Basis der Fügegeschwindigkeit für das Heizelementstumpfschweißen vor. Allerdings erlaubte dieser damalige Ansatz keine Vorhersage bezüglich geeigneter Schweißparameter auf Basis von Stoffkennwerten [Zee78].



**Abbildung 10: Darstellung zur Erläuterung und Abgrenzung Fügegeschwindigkeit - Fließgeschwindigkeit**

Potente veröffentlichte in einem DVS-Bericht im Jahre 1983 mit dem Titel „Analyse des Heizelementstumpfschweißprozesses von Rohren aus teilkristallinen Thermoplasten“ [Pot83] eine erste theoretische Analyse des Heizelementstumpfschweißprozesses. Dieser erweiterte Ansatz zur Beschreibung des Quetschfließverhaltens in der Fügephase erlaubte bereits zu dieser Zeit eine Berücksichtigung des strukturviskosen Verhaltens der Kunststoffschmelze bei der Berechnung des zeitlichen Fügewegverlaufs. Auch hier handelte es sich z.B. um eine rein theoretische Betrachtung, die eine mathematische Beziehung lieferte, Schweißparameter von kleinen Rohren auf große Rohre zu übertragen. Experimentell nachgewiesen wurde diese theoretische Analyse erst durch Tappe und Potente in späteren Arbeiten [Pot85]. Tappe und Potente zeigten schließlich in den späten 80er Jahren, dass die Schweißnahtqualität in Abhängigkeit des dimensionslosen Fügeweges ein Maximum durchläuft und dieser unabhängig von der Wanddicke ist (untersucht wurden in diesem Projekt ausschließlich Rohre), das heißt, dass der Fügedruck wanddickenunabhängig gewählt werden kann [Pot85, Tap89].

## 2. Stand der Wissenschaft

Michel P. griff 1989 wiederum diese Ansätze in seiner Dissertation auf und erweiterte sie mit einer zeitabhängigen Korrekturfunktion, welche es ihm ermöglichte, den dimensionslosen Fügeweg exakt zu berechnen. Die Untersuchungen basierten zu dieser Zeit auf PE-HD-Werkstoffen. Folglich stand eine Möglichkeit zur Verfügung, den Fügedruck zum Erreichen einer hochwertigen Fügenaht zu berechnen [Mic87]. Die Dissertation von Tappe P. 1989 bildete also eine Grundlage für eine ganzheitliche mathematische Beschreibung des Heizelementstumpfschweißprozesses unter idealen Bedingungen für in erster Linie einen Polyethylen- und einen Polypropylenwerkstoff [Tap89].

Natrop J. erarbeitete 1992 aus allen bisher entwickelten Ansätzen eine rechnergestützte Parameteroptimierung und Qualitätssicherung für die Serienfertigung am Beispiel des Heizelementstumpfschweißprozesses [Nat92] auf Basis von Kraft- und Wegsensoren. Durch den Einsatz von Rechnerarchitekturen sollten, aufbauend auf den bisherigen Erkenntnissen, optimale Schweißparameter vorhergesagt werden können und so eine Art „Selbstoptimierung“ des Prozesses erreicht werden. Der verwendete Computer sollte anhand von gezielten experimentellen Versuchen Schweißparameter für den jeweils nächsten Prozessschritt vorhersagen und gleichzeitig überprüfen können [Nat92].

### 2.2.3.2. Angleichen

#### Experimentelle Ansätze zur Parameterfindung und Prozessoptimierung

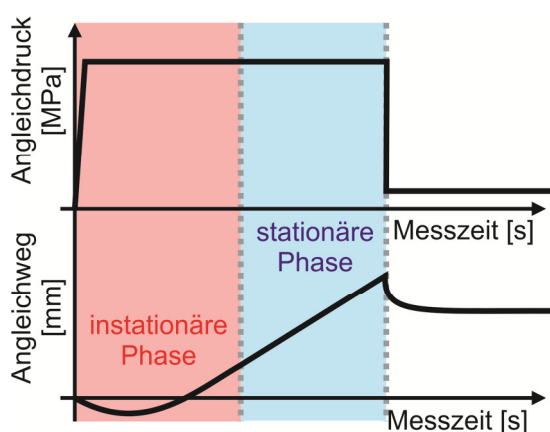


Abbildung 11: Druck- und Wegverlauf über die Messzeit für die Angleichphase [Nat92, angepasst]

Derzeit existieren nur sehr wenige Ansätze zur praxisrelevanten Bestimmung der optimalen Angleichzeit. Optisch erfolgt die Optimierung so, dass bewertet wird, wann sich im Angleichschritt ein komplett umlaufender Wulst um das Bauteil gebildet hat. Ist dies der Fall, wird manuell die Anwärmzeit eingeleitet.

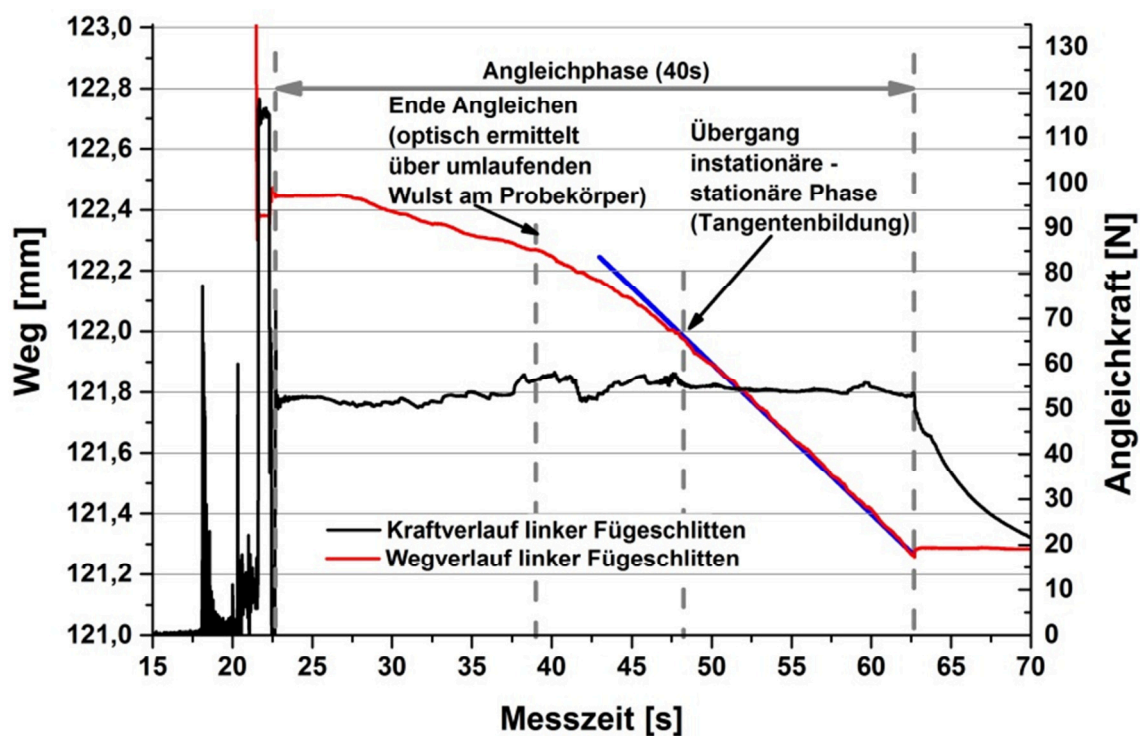
Einer der vielversprechendsten Ansätze, welcher auch vollautomatisiert erfolgen kann, ist die Auswertung von Wegsensoren während des Angleichprozesses. Ein Ansatz von Natrop nutzt beispielsweise die eingebauten Wegsensoren zur Überwachung der Fügeschlittenposition und wertet den Weg-Zeit-Verlauf hinsichtlich einer instationären und einer stationären Angleichphase aus (siehe Abbildung 11). In der instationären Phase wird angenommen, dass auf Grund von Unebenheiten ein nichtlinearer Abschmelzprozess vorliegt und der Plastifizierungsweg nicht konstant ist, während in der stationären Phase von einem flächigen Anliegen des Probekörpers und somit einem linearen Abschmelzweg ausgegangen wird. Die Detektion des optimalen Angleichwegs erfolgt über die Detektion des Übergangs einer instationären zu einer stationären Phase [Nat92].

Ein Defizit ist jedoch, dass dieser Ansatz für kraftgeregelte Prozesse konzipiert ist und bei weggeregelten Prozessen, wenn überhaupt, nur stark eingeschränkt funktioniert. Bei einem kraftgeregelten Prozess werden Kräfte geregelt und die Wege ergeben sich automatisch, während bei einem weggeregelten Prozess auf einen vorgegebenen Weg geregelt wird und die Kraft zum Erreichen des Weges variiert wird [Nat92]. Folglich ist bei einem weggeregelten Prozess der Wegverlauf mit starken Regelschwankungen behaftet und kann im Normalfall nicht ausreichend fein ausgewertet werden. Abbildung 12 zeigt die Auswertung eines kraftgeregelten Schweißprozesses über die Nutzung des stationären und instationären Bereiches des Wegverlaufs. Zu erkennen ist, dass der Übergang vom stationären zum instationären Bereich über die grafische Auswertung der Aufzeichnung bei einer Messzeit von etwa 48s liegt. Der optisch ermittelte Wert (umlaufender Wulst am Heizelement in der Angleichphase) für das Ende des Angleichschritts liegt bei 39s. D.h. die Auswertung über einen stationären und instationären Bereich erfolgt in diesem Fall 9s später als der optische. Hinzu kommt noch, dass hier für die Betrachtung eine Angleichzeit von 40s zur Verfügung stand und somit die Kurvenverläufe mit einer deutlich höheren Sicherheit ausgewertet werden konnten. Es konnte zur Auswertung eine Tangente an die Kurve angelegt werden. Im realen Prozess kann davon ausgegangen werden, dass die Detektion des optimalen Angleichvorgangs später geschieht als bei einer Messzeit von 49s, weil je nach Auswertalgorithmus die stationäre Phase von der Software sicher über eine definierte

## 2. Stand der Wissenschaft

Zeit als Gerade erkannt werden muss, um eine Umschaltung zur Anwärmphase auszulösen.

Zudem ist zu erwähnen, dass die Literatur keine Aussage darüber liefert, wie zuverlässig eine Bewertung über stationäre und instationäre Bereiche ist. Es ist nicht näher ausgeführt, welche Auswirkungen starke Winkelabweichungen zwischen Probekörper und Füge teil zur Folge haben, oder ob das System tendenziell längere Angleichzeiten zulässt, als optisch nötig.



Material	Polyethylen
Probekörperabmaße [mm]	6 x 50
Heizelementtemperatur [°C]	260
Angleichzeit [s]	40
Angleichdruck [MPa]	0,10
Anwärmzeit [s]	100
Umstellzeit [s]	< 5
Fügezeit [s]	80
Fügedruck [MPa]	0,10

Abbildung 12: Darstellung des Wegverlaufs sowie des Kraftverlaufs über die Messzeit für die Angleichphase

**Theoretische Ansätze zur Parameterauswahl und Prozessoptimierung**

Eigentlich wäre für das Angleichen die Betrachtung von einer Überlagerung von Wärmeleitung und Fließvorgängen notwendig. Da dies schnell in einem lediglich numerisch lösbaren Ansatz endet, nutzen bisherige Arbeiten ein sehr langsames Quetschfließen und folglich das Newton'sche Fließgesetz zur Beschreibung der Angleichphase. Das Newton'sche Fließgesetz beschreibt Flüssigkeiten (Newton'sche Flüssigkeiten), bei denen zwischen Schubspannung und Schergeschwindigkeit eine Proportionalität besteht. Der Proportionalitätsfaktor ist in diesem Falle die Viskosität [Pot04]. Im weiteren Schritt wurden die prozessrelevanten Einflussgrößen zusammengefasst und es ist auf dimensionsanalytischer Basis der nachfolgende Zusammenhang erarbeitet worden (siehe Gleichung 1 bis Gleichung 4). Obwohl es sich hierbei um eine rein empirisch ermittelte Formel handelt, erfolgte die Verknüpfung der dimensionslosen Kennzahlen  $\pi_P$  und  $\Theta_K$  unter Berücksichtigung der dimensionslosen Péclet-Zahl (Verhältnis konvektiv transportierter zu geleiteter Wärmemenge [Aca13]). Dies zeigt, dass dieser Ansatz auf Basis von Überlegungen zu entsprechenden Wärmetransportvorgängen während des Prozesses [Tap86, Pot04] und die Zusammenfassung in einer Formel auf empirischer Art und Weise entstanden ist.

Gleichung 1 verknüpft, wie bereits erwähnt, über die dimensionslose Beschreibung (Gleichung 2 bis Gleichung 4) den Angleichweg, die Angleichzeit, den Angleichdruck und die Temperatur mit der Wanddicke.  $c_1$ ,  $c_2$  und  $c_3$  sind materialabhängige Kennwerte, die experimentell ermittelt wurden und für jedes Material neu bestimmt werden müssen. Beispielsweise ist für ein Hostalen GM 5010 T2 (Polyethylen)  $c_1 = 0,112$ ,  $c_2 = 1,9075$  und  $c_3 = 0,7362$ .

## 2. Stand der Wissenschaft

$$P_e = c_1 \cdot (1 - \Theta_K)^{c_2} \cdot \pi_p^{c_3}$$

Gleichung 1

mit

$$\pi_p = \frac{p_A}{\eta} \cdot \left(\frac{s_A}{d}\right)^2 \cdot t_A$$

Gleichung 2

$$\Theta_K = \frac{T_K - T_0}{T_G - T_0}$$

Gleichung 3

$$P_e = \frac{s_A^2}{a_M \cdot t_A}$$

Gleichung 4

$a_M$	= Temperaturleitfähigkeit der Schmelze [m <sup>2</sup> /s]
$c_1$	= materialabhängiger Kennwert [-]
$c_2$	= materialabhängiger Kennwert [-]
$c_3$	= materialabhängiger Kennwert [-]
$d$	= Bauteildicke [m]
$P_e$	= Pécelet Zahl [-]
$p_A$	= Angleichdruck [kg/m*s <sup>2</sup> ]
$\pi_p$	= dimensionslose Kennzahl beim Angleichen [-]
$s_A$	= Angleichweg [m]
$t_A$	= Angleichzeit [s]
$T_K$	= Kristallitschmelztemperatur [K]
$T_0$	= Umgebungstemperatur [K]
$T_G$	= Grenzflächentemperatur [K]
$\eta$	= Viskosität [kg/(m*s)]
$\Theta_K$	= dimensionslose Schmelztemperatur [-]

Auf Basis dieser vier empirisch abgeleiteten Gleichungen wurde unter Berücksichtigung der materialabhängigen Kennwerte eine Angleichwegbeziehung erstellt. Hierzu wurden die Gleichungen (Gleichung 1 bis Gleichung 5) ineinander eingesetzt und nach dem Angleichweg umgestellt. Somit konnte der Angleichweg als Funktion von Angleichzeit, Rohrwanddicke, Grenzflächentemperatur, Druck und Materialkennwerten berechnet werden (siehe Gleichung 5). Physikalisch liegen diesem Ansatz, wie bereits erwähnt, ein langsames Quetschfließen und folglich das Newton'sche Fließgesetz zu Grunde. Weiterhin wurden invariante Stoffkennwerte angenommen.

$$s_A = \left[ c_1 \cdot a_s \cdot (1 - \Theta_K)^{c_2} \cdot \left( \frac{p_A}{\eta \cdot d^2} \right)^{c_3} \cdot t_A^{1+c_3} \right]^{\frac{1}{c_2-2 \cdot c_3}}$$

Gleichung 5

$a_M$	= Temperaturleitfähigkeit der Schmelze [m <sup>2</sup> /s]
$c_1$	= materialabhängiger Kennwert [-]
$c_2$	= materialabhängiger Kennwert [-]
$c_3$	= materialabhängiger Kennwert [-]
$d$	= Bauteildicke [m]
$P_e$	= Pécret Zahl [-]
$p_A$	= Angleichdruck [kg/m*s <sup>2</sup> ]
$s_A$	= Angleichweg [m]
$t_A$	= Angleichzeit [s]
$\eta$	= Viskosität [kg/(m*s)]
$\Theta_K$	= dimensionslose Schmelztemperatur [-]

Da bei der Wahl einer optimalen Angleichzeit das plastifizierte Material unmittelbar über den anliegenden Angleichdruck verdrängt wird, wird hier davon ausgegangen, dass keine Schmelzschichtdicke vorliegt. Die Schmelzschichtdicke entspricht dem Bereich der Fügezone, welcher temporär in die schmelzflüssige Phase überführt wurde (vgl. Abbildung 7).

An dieser Stelle ist wichtig zu erwähnen, dass für die Nutzung der dimensionslosen Kennwerte aus Gleichung 1, für jedes untersuchte Material für drei verschiedene Grenzflächentemperaturen das x-y-Diagramm mit  $\pi_p$  auf der Abszisse und  $P_e^{-1}$  auf der Ordinate angetragen, eine Ausgleichsgerade für jede dieser Kurven erstellt und entsprechend diese drei Gleichungen mit drei Unbekannten ( $c_1$ ,  $c_2$  und  $c_3$ ) gelöst werden muss, um überhaupt die Kenngrößen  $c_1$ ,  $c_2$  und  $c_3$  zu bekommen. Problematisch bleibt dann aber immer noch, dass diese Kennzahlen zum einen stark vom Werkstoff abhängen und zum anderen auch innerhalb des gleichen Werkstoffes selbst durch Fügeteilunebenheiten (Schwindungen, Agglomerate, etc.) deutlich beeinflusst werden können [Pot04].

Ein weiterer wichtiger Punkt, der sowohl die Angleichphase als auch die Anwärmphase betrifft, ist die Bestimmung der Grenzflächentemperatur zur Bestimmung der dimensionslosen Schmelztemperatur. Laut [Tap89] hat diese einen deutlichen Einfluss auf die Übereinstimmung zwischen theoretischer Berechnungen und experimenteller Ergebnisse. Es wurde bislang keine Mög-

lichkeit vorgestellt, wie die Grenzflächentemperatur exakt bestimmt werden kann. Aktuelle Untersuchungen nutzen immer noch das in zahlreichen Quellen (z.B. [Nat92, Pot08]) vorgeschlagene Verfahren, bei dem Thermoelemente in die zu fügenden Bauteile direkt eingebracht werden. Die Grenzflächentemperatur wird dabei ermittelt, indem ein Thermodraht während der Angleichphase und der Anwärmphase zwischen das Heizelement und das Fügeteil gebracht wird. Dies hat jedoch die bekannten Nachteile, dass zum einen die Schweißung stark durch den Thermodraht an sich beeinflusst wird (Thermodraht entspricht Störstelle mit eigener Wärmekapazität und -leitfähigkeit) und zum anderen Fließvorgänge den Draht bewegen und sich dies stark auf die Reproduzierbarkeit bzw. die Genauigkeit der Messungen auswirkt. Hinzu kommt, dass die Probe mit eingeschweißtem Thermodraht in aller Regel nicht weiter verwendet werden kann und als Ausschuss zu werten ist.

### 2.2.3.3. Anwärmen

#### **Experimentelle Ansätze zur Parameterauswahl und Prozessoptimierung**

Eine Optimierung der Anwärmphase erfolgt derzeit nahezu ausschließlich über das Kriterium der Restschmelzschichtdicke. Die Restschmelzschichtdicke bedient sich hierbei der Thermodynamik in Kombination mit empirisch ermittelten Kenngrößen. Obwohl der Anwärmzeit eine zentrale Rolle bezüglich der Nahtqualität zukommt, existiert derzeit keine Möglichkeit, die thermodynamischen Zusammenhänge zwischen Heizelement und Fügeteil, sprich die Plastifizierung der Fügepartner, direkt messtechnisch zu erfassen, zu überwachen und zu protokollieren. Weder der Kraft- noch der Wegsensor liefern direkt verwertbare Ergebnisse zur Optimierung der Anwärmzeit. Selbst das Thermoelement im Heizelement liefert keine ausreichenden Aussagen hierzu, da es zentral im Heizelement verbaut ist und die Geschehnisse auf der Oberfläche des Heizelements nicht ausreichend detailliert abbilden kann.

#### **Theoretische Ansätze zur Parameterauswahl und Prozessoptimierung**

Die Beschreibung der Anwärmphase kann lediglich anhand theoretischer Ansätze erfolgen. Hierzu wird von einer eindimensionalen Wärmeleitung nach Fourier in der nachfolgenden Form (vgl. Gleichung 6 und Gleichung 7) [Tap89] ausgegangen:



$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial s^2}$$

Gleichung 6

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$$

Gleichung 7

<b><math>a</math></b>	= Temperaturleitfähigkeit der Schmelze [m <sup>2</sup> /s]
<b><math>c_p</math></b>	= spezifische Wärmekapazität [J/(kg·K), m <sup>2</sup> /(K·s <sup>2</sup> )]
<b><math>\lambda</math></b>	= Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K), (kg·m)/(s <sup>3</sup> ·K)]
<b><math>\rho</math></b>	= Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]
<b><math>\vartheta</math></b>	= Temperatur [°C]
<b><math>s</math></b>	= Ortskoordinate [m]
<b><math>t</math></b>	= Zeit [s]

Mit den Randbedingungen konstanter Temperaturleitfähigkeit, konstanter Grenzflächentemperatur, konstanter Umgebungstemperatur für  $x \rightarrow \infty$  und die Vernachlässigung von Konvektion und Strahlung zeigt Abbildung 13 die Lösung des Temperaturfelds in dimensionsloser Form. Die theoretische Berechnung in tabellarischer Form geht auf Carslaw H. und Jaeger J. [Car59] zurück.

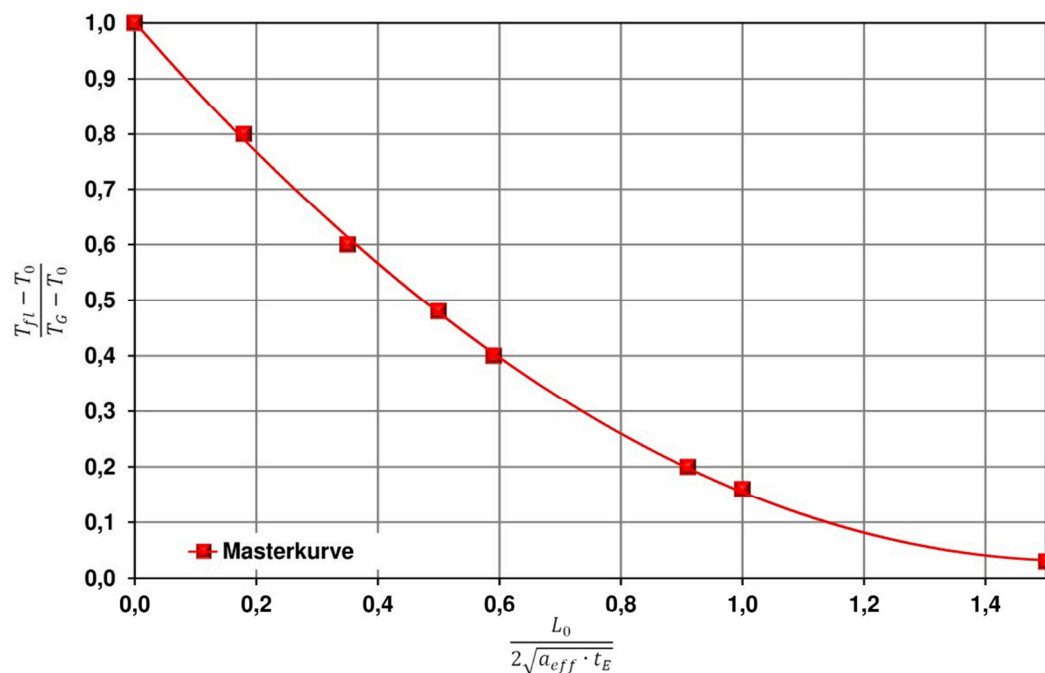


Abbildung 13: Berechnetes Temperaturprofil für die Anwärmphase [Pot04, Tap89]

## 2. Stand der Wissenschaft

---

Die Approximation der in Abbildung 13 dargestellten, so genannten Masterkurve, sieht wie folgt aus (vgl. Gleichung 8) [Tap89, Pot04]:

$$\Theta_{fl} = \frac{T_{fl} - T_0}{T_G - T_0} = 1 - 1,06 \cdot \frac{L_0}{2\sqrt{a_{eff} \cdot t_E}}$$

**Gleichung 8**

$a_{eff}$  = effektive Temperaturleitfähigkeit [m<sup>2</sup>/s]  
 $L_0$  = Schmelzeschichtdicke [m]  
 $t_E$  = Erwärmzeit [s]  
 $T_0$  = Ausgangstemperatur  $\triangleq$  Umgebungstemperatur [°C]  
 $T_{fl}$  = Kristallitschmelztemperatur bzw. Glasübergangstemperatur [°C]  
 $T_G$  = Massetemperatur  $\triangleq$  Grenzflächentemperatur Heizelement – Schweißteil [°C]  
 $\Theta_{fl}$  = dimensionslose Schmelztemperatur [-]

Die Schmelzschichtdicke kann somit wie folgt berechnet werden (vgl. Gleichung 9) [Tap89, Pot04].

$$L_0 = \frac{2}{1,06} \cdot (1 - \Theta_{fl}) \cdot \sqrt{a_{eff} \cdot t_E}$$

**Gleichung 9**

$a_{eff}$  = effektive Temperaturleitfähigkeit [m<sup>2</sup>/s]  
 $L_0$  = Schmelzeschichtdicke [m]  
 $t_E$  = Erwärmzeit [s]  
 $\Theta_{fl}$  = dimensionslose Schmelztemperatur [-]

Voraussetzung ist in diesem Fall, dass die Angleichzeit gegenüber der Anwärmzeit kurz war und ein hoher Angleichdruck verhinderte, dass sich eine Schmelzschichtdicke in der Angleichphase gebildet hat [Tap89, Pot04].

Das optimale Schmelzschichtdicken-/Wanddicken-Verhältnis ist laut aktuellen Untersuchungen bei amorphen Kunststoffen 1,14 und bei teilkristallinen Kunststoffen 0,34. Als erste Näherung für eine Heizelementtemperatur wird hierzu für teilkristalline Thermoplaste eine Heizelementtemperatur von 80°C oberhalb der Kristallisationstemperatur angenommen. Bei amorphen Kunststoffen wird eine Heizelementtemperatur im Bereich von 160°C oberhalb des Glasübergangspunktes gewählt [Tap89].

Nachfolgende Abbildung 13 zeigt ein Diagramm zur Bestimmung der optimalen Heizelementtemperaturen für amorphe und teilkristalline Thermoplaste, wie diese an verschiedenen Stellen in der Literatur zu finden sind [Pot04].

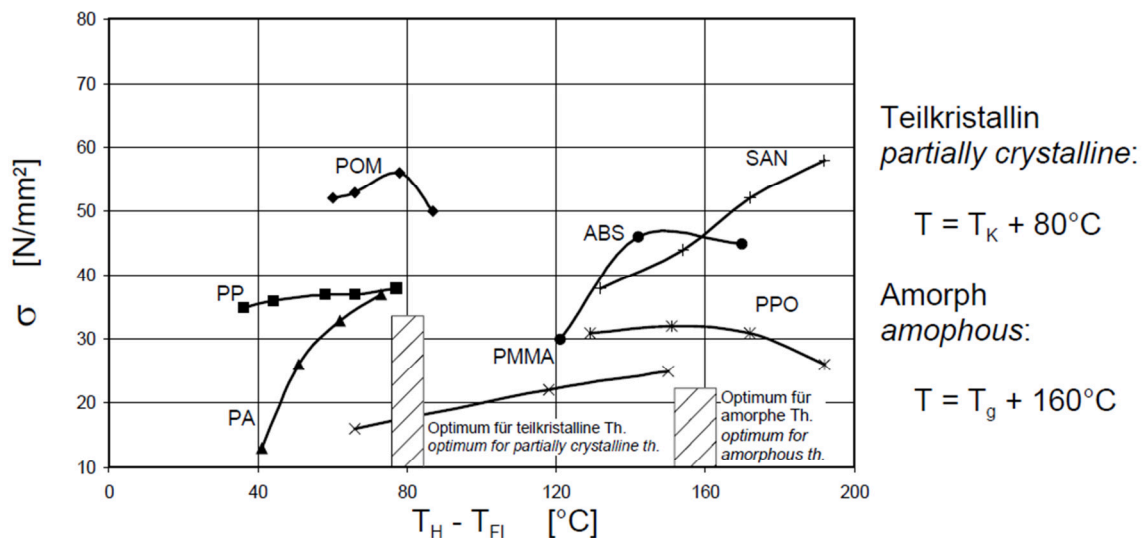


Abbildung 14: Diagramm zur Bestimmung der optimalen Heizelementtemperatur  $T_H$  für amorphe und teilkristalline Thermoplaste nach [Pot04];

$T_H$  = Heizelementtemperatur [°C]

$T_{Fl}$  = Fließtemperatur [°C] (Kristallitschmelztemperatur  $T_K$  bei teilkristallinen, Glasübergangstemperatur  $T_g$  bei amorphen Thermoplasten)

$\sigma$  = Bruchspannung der jeweiligen Probe im Zugversuch [N/mm²]

Publizierte Richtwerte bezüglich der effektiven Temperaturleitfähigkeit  $a_{eff}$  zur Anwendung der beschriebenen Ansätze zeigt Tabelle 2.

Tabelle 2: Effektive Temperaturleitfähigkeit als Konstante für verschiedene Thermoplaste nach [Pot04]

Material	Effektive Temperaturleitfähigkeit [mm²/s]	Bezugstemperatur [°C]
PE	0,08	220
PP	0,10	220
POM	0,11	220
PA 6	0,05	270
ABS	0,19	250
PMMA	0,17	260
SAN	0,23	260
PPO	0,20	260

## 2. Stand der Wissenschaft

Parallel zum Diagramm aus Abbildung 14 ist auch des Öfteren ein überwiegend empirisch erarbeitetes Diagramm zu finden, indem die optimalen Verhältnisse der Schmelzschichtdicke  $L_0$  zur Wanddicke der Bauteile über die Festigkeit angetragen sind. Abbildung 15 zeigt die Ergebnisse dieser experimentellen Versuche nach [Pot04].

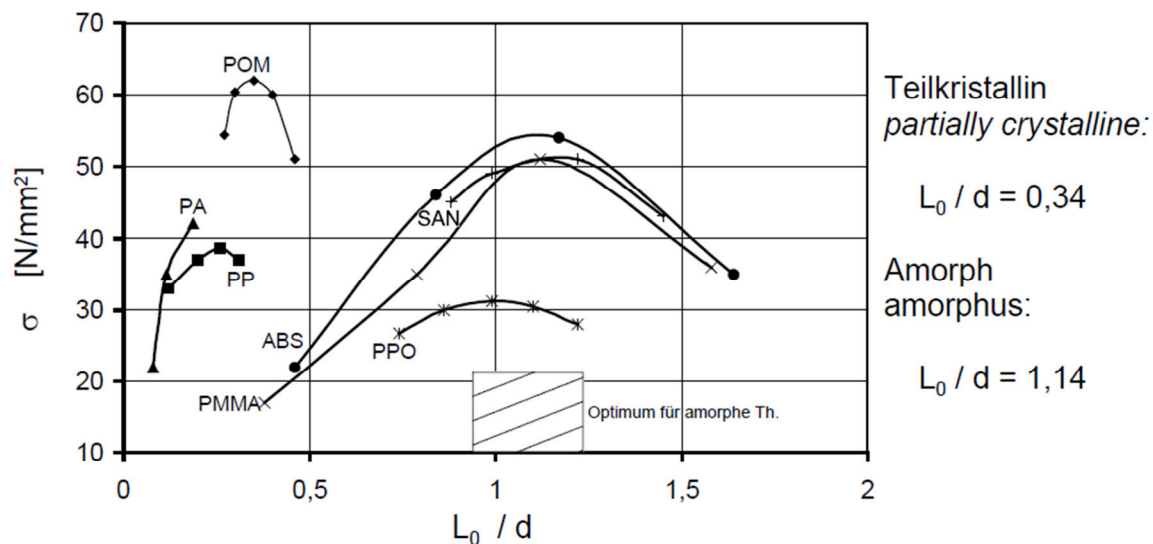


Abbildung 15: Diagramm zur Bestimmung des optimalen Verhältnisses aus Schmelzschichtdicke  $L_0$  und Bauteilwanddicke  $d$  für amorphe und teilkristalline Thermoplaste nach [Pot04];

$L_0$  = Schmelzschichtdicke [mm]

$d$  = Bauteilwanddicke [mm]

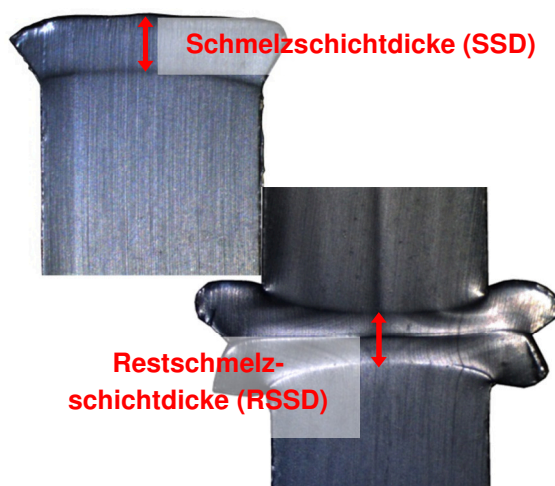
$\sigma$  = Bruchspannung der jeweiligen Probe [N/mm<sup>2</sup>]

Obwohl die Abbildung 14 als auch die Abbildung 15 einen relativ konkreten Zusammenhang zwischen der optimalen Heizelementtemperatur bzw. dem optimalen Schmelzschichtdicke/Wanddickenverhältnis suggerieren, ergeben sich in der Praxis diverse Defizite bei der Anwendung dieser Sachverhalte. Zum einen ist die Auswertung der Schmelzschichtdicke immer eine zerstörende Prüfung und zum anderen nicht für alle Materialien trivial.

In der Kunststoffindustrie beschreibt die Schmelzschichtdicke die Materialmenge, welche vor dem Fügeschritt in der Angleich- und Anwärmphase oder nach dem Fügeschritt auf Grund der Temperatureinwirkung bedingt durch den Schweißvorgang lokal und dank anderer morphologischer Strukturen detektiert werden kann. Bei teilkristallinen Thermoplasten tritt die Plastifizierung

nach dem Überschreiten der Kristallisationstemperatur ein und bei amorphen Thermoplasten ab der Glasübergangstemperatur (oberhalb Glastemperatur kontinuierliche Erweichung).

Um in einzelnen Fällen auch begrifflich die Probenentnahme nach der Anwärmzeit und nach dem Fügen differenzieren zu können, haben sich die Begriffe Schmelzschichtdicke (SSD) und Restschmelzschichtdicke (RSSD) bewährt. Abbildung 16 zeigt typische Schmelzschichtdicken und Restschmelzschichtdicken für einen Heizelementstumpfschweißprozess. Die Schmelzschichtdicke ist nach dem Anwärmen zu detektieren, während die Restschmelzschichtdicke erst nach dem Fügen ermittelt werden kann.



**Abbildung 16: Mikroskopisch bestimmte Schmelzschichtdicke nach der Anwärmphase (links oben); Restschmelzschichtdicke nach der Fügephase (rechts unten) über die Methode des Beflammens**

Die SSD und RSSD ist zu erkennen, wenn die Fügepartner nach dem Anwärmen oder nach dem Fügen einer entsprechenden Probenpräparation unterzogen werden. Hierzu zählen beispielsweise das Beflammen der Fügeflächen oder das Erstellen von so genannten Dünnschnitten. Da der Erfolg dieser der Probenpräparation sehr stark materialabhängig ist, existiert beispielsweise ein Ansatz zur Bestimmung direkt in der Schweißmaschine über das Verdrängen der plastifizierten Schmelze mit maximalem Maschinendruck. Hierbei

wird ein sehr hoher Fügedruck angewandt, der die plastifizierte Schmelze aus der Fügezone drückt. Der dabei zurückgelegte Weg kann mit Hilfe von Wegsensoren gemessen werden. Die Literatur geht in einem solchen Fall davon aus, dass 95% der Schmelze über diese Art der Herangehensweise verdrängt wird [Nat92, Krei88]. Allerdings ist auch diese Möglichkeit der Bestimmung nicht ohne Nachteile. Das Defizit hierbei besteht darin, dass einerseits die Maschine solch hohe Drücke (mindestens 1 – 2 MPa, je nach Kunststoff) aufbringen können muss. Zum anderen kann besonders bei Bauteilen mit dünnen

## 2. Stand der Wissenschaft

---

Wandstärken nur schwer unterschieden werden, ob der komplette gemessene Weg durch eine Materialverdrängung entstanden ist oder sich das Bauteil durch den hohen Druck deformiert hat. Die Wegmesssensoren sind am Füge-schlitten angebracht und somit ist eine Differenzierung zwischen der Schmelze-verdrängung und der Deformation des Bauteils nicht ohne weiteres mög-lich.

Auch die Bestimmung von  $a_{\text{eff}}$  kann in einer Schweißmaschine über entspre-chende Versuche ermittelt werden. Hierzu wird in [Nat92] beispielsweise die An-wärmzeit verändert und mit Hilfe des beschriebenen Vorgehens zur Detek-tion der Schmelzschichtdicke über das Verdrängen der Schmelze mit maxima-lem Druck,  $L_0$  ermittelt. Dann wird sich der Masterkurve aus Abbildung 13 bedient und eine Variable  $B$  für die Abszisse eingeführt (vgl. Gleichung 10).

$$B = \frac{L_0}{2 \cdot \sqrt{a_{\text{eff}} \cdot t_E}}$$

**Gleichung 10**

$a_{\text{eff}}$	= effektive Temperaturleitfähigkeit [m <sup>2</sup> /s]
$L_0$	= Schmelzschichtdicke [m]
$t_E$	= Erwärmzeit [s]
$B$	= Variable [mm <sup>2</sup> /s]

Zur Berechnung der Ordinate der Masterkurve aus Abbildung 13 wird ange-nommen, dass die Grenzflächentemperatur 10°C unterhalb der Heizele-menttemperatur liegt [Nat92]. Messtechnisch kann, wie bereits erwähnt, diese Größe derzeit nicht gemessen werden. Die Heizelementtemperatur selbst wird gemäß der Abbildung 14 abgeschätzt. Da die Ordinate der Masterkurve somit berechnet werden kann, ist auch  $B$  bekannt und die Gleichung 10 kann nach  $a_{\text{eff}}$  umgestellt werden.  $L_0$  wird, wie bereits erwähnt, aus den experimentellen Versuchen (Verdrängungsversuchen) ermittelt.  $a_{\text{eff}}$  errechnet sich somit über die Nutzung der Gleichung 11 wie folgt [Nat92].

$$a_{eff} = \left( \frac{L_0}{2 \cdot B} \right)^2 \cdot \frac{1}{t_E}$$

Gleichung 11

$a_{eff}$  = effektive Temperaturleitfähigkeit [m<sup>2</sup>/s]  
 $L_0$  = Schmelzschichtdicke [m]  
 $t_E$  = Erwärmzeit [s]  
 $B$  = Variable [mm<sup>2</sup>/s]

Abbildung 17 zeigt die Ergebnisse laut [Nat92] für das Material ABS und PPN für die Anwärmzeiten von 20s, 30s, und 60s. Die Ergebnisse wurden mit einer Regressionsgeraden versehen, um für weitere Anwärmzeiten linear interpolieren und extrapolieren zu können [Nat92]. Je nach Ausführung der Schweißmaschine ist die Bestimmung von  $a_{eff}$  mit mehr oder weniger Defiziten behaftet. Ist die Bestimmung nicht möglich und  $a_{eff}$  muss abgeschätzt werden, kann dies die Aussagekraft der Untersuchungen stark beeinflussen. Messtechnisch ist  $a_{eff}$  nur sehr schwer abseits der Schweißmaschine bestimmbar. Hier gibt es keine Aussagen zu Korrelationen mit beispielsweise Apparaturen zur Bestimmung von Wärme- und Temperaturleitfähigkeiten im Bereich Thermophysical Properties.

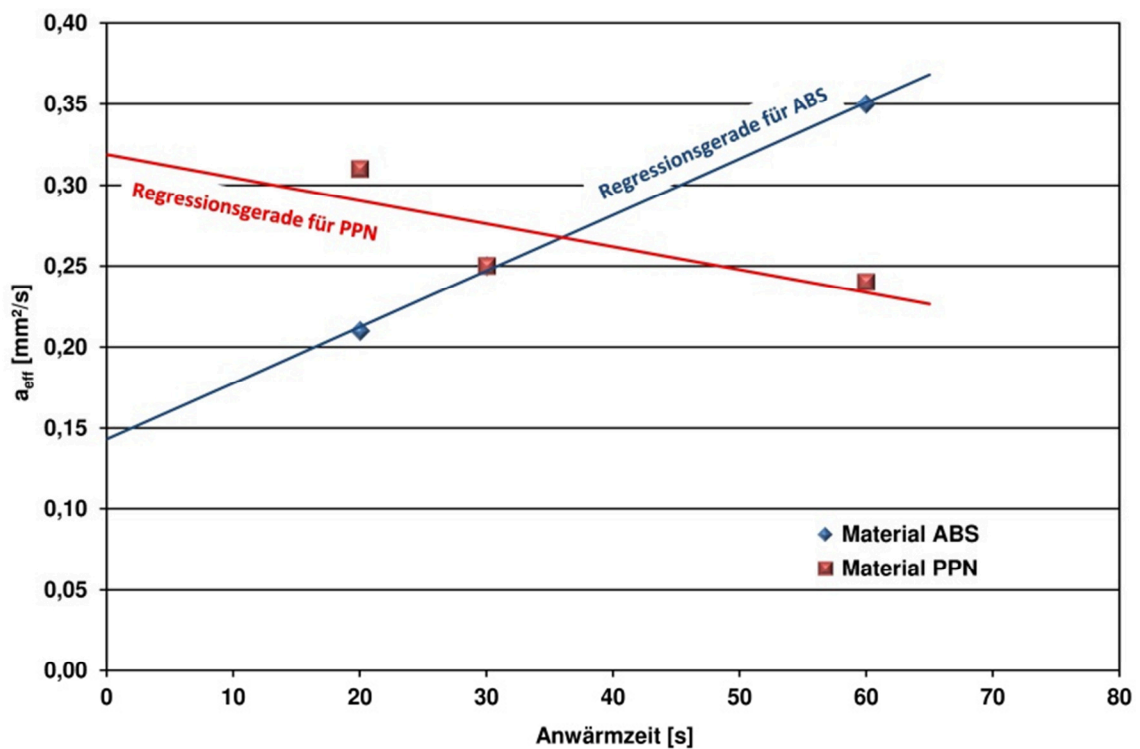


Abbildung 17: Effektive Temperaturleitfähigkeit für ABS und PPN nach [Nat92]

### 2.2.3.4. Umstellen

Bezüglich des Umstellens gibt es weitestgehend keine praxisrelevanten Ansätze zur Optimierung außer, dass mit maximaler Geschwindigkeit gefahren wird. Wenn eine gesonderte Optimierung stattfinden muss, werden diverse Ansätze zur Berechnung der Oberflächentemperatur in der Umstellphase herangezogen (siehe [Tap89]). Da die Einhaltung der maximalen Umstellzeit nicht mehr das Thema in einer Serienproduktion ist, sollen hier die theoretischen Ansätze nicht näher erläutert werden. Sie können bei Bedarf in der entsprechenden Literatur nachgelesen werden. Zudem liefern die Richtlinien des DVS für verschiedene Materialien maximal mögliche Umstellzeiten. Diese liegen beispielsweise bei Polyethylen, Wanddicke 4,5 mm bis 7 mm, im Bereich von maximal 5 s bis 6 s und verlängern sich entsprechend mit der Dicke der Bauteile.

### 2.2.3.5. Fügen

#### **Experimentelle Ansätze zur Parameterauswahl und Prozessoptimierung**

Ansätze zur Optimierung des Fügeschritts basieren auf thermodynamischen Zusammenhängen in Kombination mit den Informationen aus Kraft- und Wegaufzeichnungen. Die Fügezeit muss so gewählt werden, dass das Bauteil kalt genug ist für einen Handlingschritt und das Heizelement gleichzeitig genug Zeit bekommt, sich wieder einzuregeln und zu homogenisieren. Bezüglich der Homogenisierung der Heizelementoberfläche existieren lediglich praxisrelevante Ansätze, bei denen das Schweißpersonal die Oberflächentemperatur des Heizelements manuell mit Hilfe von Oberflächenfühlern überwacht. Im Labormaßstab sind auch Überwachungen des Heizelements mittels Thermobildkamera angedacht und vereinzelt für Versuchszwecke existent. Ein Sensor im Bereich der Fügezone auf der Oberfläche des Heizelements zur permanenten Detektion der Oberflächentemperatur im Bereich der Fügezone existiert nicht.

Die experimentelle Vorgehensweise zur Erzielung einer optimalen Nahtqualität sieht wie folgt aus. Es wurde auf Basis empirischer Versuche festgestellt, dass 75% der in der Anwärmphase produzierten Schmelze (Schmelzschichtdicke) aus der Fügezone verdrängt werden muss, um eine optimale Nahtqualität zu erhalten. Die Ergebnisse grafisch aufbereitet zeigt Abbildung 18 für ausgewählte Materialien. Bezüglich der Maschinenteknologie muss die Schweißma-



schine hierzu allerdings über eine Regelung von Kraft- und oder Weg verfügen, bei der der maximale Weg aktiv eingegeben werden kann bzw. die Schweißmaschine den Weg automatisch berechnet. Anderenfalls ist eine Optimierung schwierig bzw. nahezu unmöglich. Denn über Wegsensoren händisch die Maschine so zu regeln, dass ein definierter Fügeweg entsteht, ist nicht praktikabel.

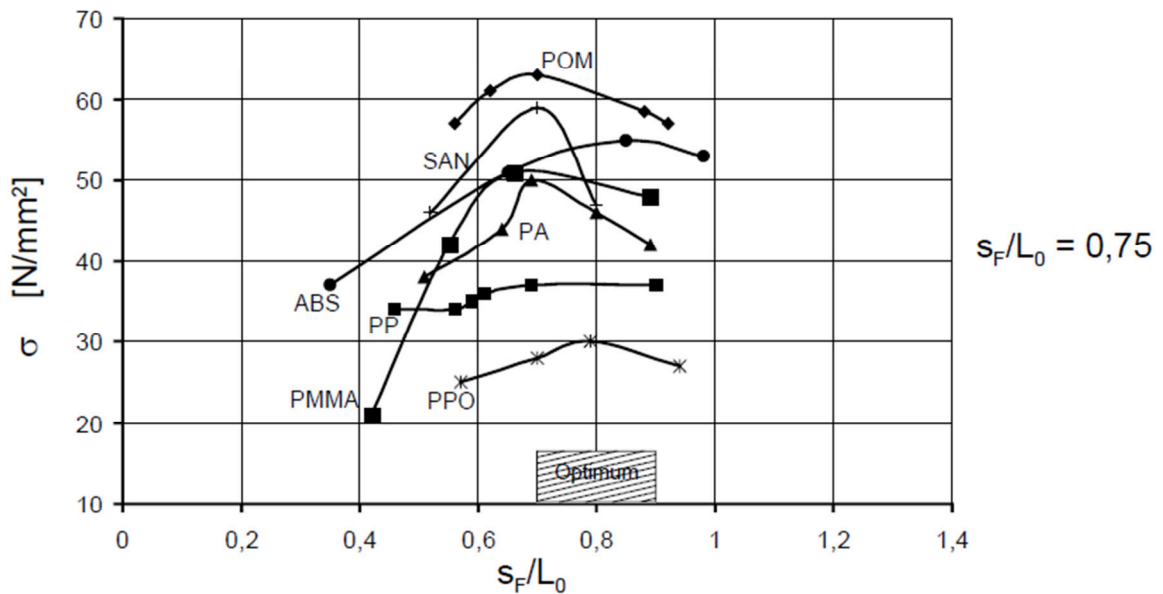


Abbildung 18: Diagramm zur Bestimmung des optimalen Verhältnisses aus Fügeweg  $s_F$  und Schmelzschichtdicke  $T_H$  für amorphe und teilkristalline Thermoplaste nach [Pot04];  $s_F$  = Fügeweg [mm],  $L_0$  = Schmelzschichtdicke [mm]  
 $\sigma$  = Bruchspannung der jeweiligen Probe [ $\text{N/mm}^2$ ]

### Theoretische Betrachtungen zur Parameterauswahl und Prozessoptimierung

Eine pauschale theoretische Betrachtung zur optimalen Abkühlzeit ist an dieser Stelle nicht sinnvoll, da je nach Bauteilgeometrie, Schweißparameter, Weiterverarbeitung der Bauteile usw. die Abkühlzeit unterschiedlich zu wählen ist. Weiterhin müsste auch differenziert werden, ob die Bauteile händisch oder maschinell entnommen werden und ob diese unmittelbar weiterverarbeitet, verpackt oder gelagert werden. Richtwerte zur Abkühlzeit können den Richtlinien entnommen werden (z.B. DVS 2215-2, 2215-3). Bezüglich des optimalen Fügewegs dominieren die praxisrelevanten Ansätze und eine theoretische Betrachtung ist nicht mehr notwendig.

### 2.2.4. Sensortechnologie für das Heizelement

Die Qualität der Schweißnaht beim Heizelementstumpfschweißen ist abhängig von der Vorgabe und Einhaltung der Schweißparameter. Abbildung 9 zeigte, dass bis in die späten siebziger Jahre große Defizite darin bestanden, dass Schweißparameter zwar erarbeitet wurden, diese aber nicht reproduzierbar eingestellt und aufgezeichnet werden konnten. Sowohl Wegsensoren, Kraftsensoren, Thermolemente als auch Steuerungen entsprechen in Heizelementstumpfschweißmaschinen dem aktuellen Stand der Technik und sind somit keine limitierende Größe mehr. Bislang zum Einsatz kommende Schweißmaschinen und darin verbaute Sensoren können Schweißparameter ausreichend genau abbilden und zufriedenstellend reproduzierbar ausführen.

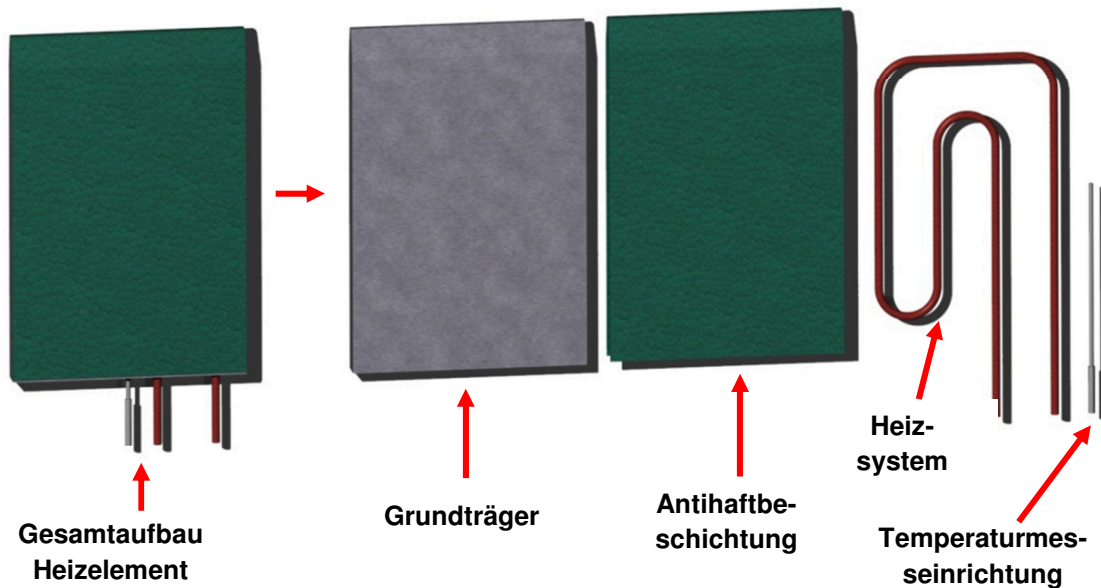
Beispielsweise erreichen kommerziell erhältliche potentiometrische Wegsensoren Wiederholgenauigkeit von 0,002mm bei zulässigen maximalen Geschwindigkeiten von bis zu 10m/s und einem Messbereich von 300mm [Ahl13, HBM13-1]. Sowohl die Genauigkeit als auch zulässige maximale Geschwindigkeit sind für den Einsatz in einer Schweißmaschine mehr als ausreichend. Die DVS-Richtlinien arbeiten mit zu erreichenden Schmelzschichtdicken zu Wanddickenverhältnissen von 0,2 – 0,4mm und Umstellzeiten von 1s bis 25s. Dies stellt für aktuelle Sensoren kein Problem dar. Einzige Schwachstelle ist die Gebrauchstemperatur von bis zu 100°C. Bei Schweißtemperaturen bis zu 300°C muss der Wegsensor ausreichend weit vom Heizelement und somit dem Schweißprozess entfernt sein. Dennoch bilden die Wegsensoren entsprechend der Vorgaben hinsichtlich Schweißparameter das Schweißgeschehen ausreichend genau ab.

Ähnlich sieht es bei Zug- und Druckkraftsensoren, realisiert über beispielsweise Dehnungsmessstreifen, aus. Kommerziell erhältliche Systeme bis  $\pm 2,5\text{kN}$  besitzen relative Kennwertabweichungen von  $\pm 0,25\%$  bei Grenzkraften von bis zu 150% [HBM13-2, HBM13-3]. Auch dies reicht für das Heizelementstumpfschweißen aus. Die Richtlinien Arbeiten beispielsweise mit Angleichdrücken von  $0,15\text{N/mm}^2$ . Ähnlich wie bei den Wegsensoren begrenzt auch hier die zulässige Gebrauchstemperatur von bis zu 85°C den Einsatz der Kraftmessdose. Äquivalent zum Wegsensor, muss der Kraftsensor in einer ausreichenden Entfernung vom Heizelement verbaut werden, damit dieser thermisch nicht geschädigt wird.

Die Dokumentation der Schweißparameter erfolgt meist über die Nutzung der verbauten Steuerung oder über externe Aufzeichnungsgeräte. Auch hier reicht der Stand der Technik vollkommen aus, um aussagekräftige Werte zu erhalten. Beispielsweise kann ein kommerziell erhältlicher Universalverstärker QuantumX MX840 der Fa. HBM bereits in der Grundausstattung acht Kanäle unabhängig von deren Beschaltung für Kraft-, Weg- oder auch Temperatursensoren, mit bis zu 40kHz abfragen und sofort auswerten. Auch dies zeigt, dass hier der Stand der Technik das Schweißgeschehen entsprechend den Vorgaben ausreichend genau abbilden kann.

### 2.2.4.1. Aufbau Heizelement

Das Heizelement ist eines der zentralen Komponenten der Schweißmaschine. Aus diesem Grund soll an dieser Stelle tiefergehend auf den Aufbau und die Funktion eingegangen werden. Es hat nicht nur die Aufgabe, die für die Plastifizierung des Kunststoffes im Schweißprozess notwendige Energie bereitzustellen, sondern trägt im nachfolgenden in modifizierter Form zur Wärmestromdichtebilanzierung entscheidend bei. Gemäß der DIN 1910 Teil 3 werden die Schweißverfahren sogar nach der Art des Energieeintrags charakterisiert und betitelt. Das Heizelementstumpfschweißen ist demzufolge eingegliedert unter „Schweißen durch feste Körper“. Die Explosionszeichnung in Abbildung 19 zeigt den grundlegenden Aufbau eines Heizelements. Dieser besteht aus einem Grundträger, einer Antihafbeschichtung, einem Heizsystem sowie einer Temperaturmesseinrichtung.



**Abbildung 19: Explosionszeichnung eines Heizelements;  
Gesamtaufbau, Grundträger, Antihafbeschichtung, Heizsystem,  
Temperaturmeseinrichtung**

Der Grundträger des Heizelements muss aus einem ausreichend wärmeleitfähigen, korrosionsbeständigen und lunkerfreien Material bestehen. Derzeit werden Heizelemente nahezu überwiegend aus Aluminium gefertigt. Grund hierfür ist die hohe Wärmeleitfähigkeit von Aluminium im Bereich von 110-140 W/(m\*K) [HAB13], gute Bearbeitbarkeit, ausreichende Formstabilität bei Schweißtemperatur sowie dem relativ geringen Gewicht. Ein weiterer Grund für den Einsatz von Aluminium ist, dass dieser Werkstoff relativ einfach mit einer Antihafbeschichtung versehen werden kann [DVS12-2]. Vereinzelt werden Heizelemente für spezielle Anwendungen auch aus anderen Metallen, Kunststoffen oder Keramiken hergestellt.

Zur Temperierung des Heizelements werden üblicherweise Widerstandheizkörper in Form von Heizpatronen eingesetzt [KLN13, Ehr04]. Die Heizpatronen müssen in ausreichender Anzahl so im Heizelement positioniert werden, dass ein unter Betriebsbedingungen homogenes und reproduzierbares Aufheizen des Heizelements im Bereich der Werkstückanlage möglich ist. In der DVS-Richtlinie ist hierzu eine Mindestleistung vorgeschrieben. Die Auslegung muss so stattfinden, dass nach dem Angleichschritt ein maximaler Temperaturgradient von 5°C im Bereich der Werkstückanlagefläche festgestellt werden kann [DVS12-3]. Hierzu werden meist spezifische Leistungen zwi-

schen  $4 \text{ W/cm}^2$  und  $20 \text{ W/cm}^2$  eingesetzt [Ehr04]. Die Temperaturspanne, die erreicht werden muss, liegt beim Heizelementstumpfschweißen zwischen  $180^\circ\text{C}$  und  $260^\circ\text{C}$ . Vereinzelt existieren Ansätze, Schweißtemperaturen bis  $300^\circ\text{C}$  zu nutzen, um die Plastifizierung und somit auch den Prozess zu beschleunigen [Kle09]. In den Richtlinien ist vorgeschrieben, dass eine Temperaturkontrolle auf der Heizelementoberfläche mit einem externen Temperaturfühler bei geringer Luftbewegung und einer Umgebungstemperatur von  $23^\circ\text{C}$  ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ) durchgeführt wird. Nach dem Aufheizen soll frühestens nach einer Betriebsdauer von 30 Minuten gemessen werden, um sicherzustellen, dass das Heizelement auf Einsatztemperatur ist und sich ausreichend homogenisiert hat. Hierzu sind mit dem Oberflächenfühler im Bereich der Anlagefläche des zu plastifizierenden Kunststoffes mehrere Messpunkte zu überprüfen.

Das Temperaturmesssystem zur Regelung der Heizelementkerntemperatur ist häufig als Mantelthermoelement ausgeführt, welches zentrisch im Grundträger in der Nähe des Heizsystems eingebracht ist. Dank der Temperaturmesseinrichtung kann ein Temperaturregelkreis aufgebaut werden. Die Feineinstellung des Heizelements auf eine definierte Oberflächentemperatur erfolgt vom Schweißpersonal anhand der Ergebnisse mit dem externen Temperaturfühler im Bereich der Fügezone. Die Fügezone stellt den Bereich dar, der während des Plastifizierschritts vom Kunststoff bedeckt wird. Bei Abweichungen zwischen eingestellter Solltemperatur und der Temperatur in der Fügezone werden in der Praxis entsprechende Anpassungen des Reglers vorgenommen [DVS12-3].

Bevor mit dem Heizelement geschweißt werden kann, müssen noch Maßnahmen bezüglich der Oberfläche des Heizelements, dem Nutzbereich des Grundträgers, getroffen werden. Sie verhindern, dass plastifizierter Kunststoff während des Schweißprozesses auf der Oberfläche zurück bleibt und gewährleisten, dass sich die Oberfläche leicht von Rückständen befreien lässt. Erreicht wird dies, indem der Grundträger mit einer Antihaftbeschichtung ausgestattet wird. Es ist üblich, eine PTFE-Schicht direkt auf die Oberfläche des Grundträgers aufzusintern, aufzukleben oder ein mit PTFE beschichtetes Glasgewebe über das Heizelement zu spannen. Beschichtungen haben sich dort behauptet, wo geringe Stückzahlen gefügt werden oder Kunststoffe zum Einsatz kommen, die wenig abrasiv wirken und bei moderaten Temperaturen

verarbeitet werden können. Dies ist der Fall im Bereich des Rohrleitungsbaus, für Tafeln oder im Behälterbau. In der Serienfertigung werden vermehrt Klebefolien eingesetzt, da der hohe Durchsatz ein häufigeres Wechseln der Beschichtung notwendig macht. Heizelemente mit aufgesinterter PTFE-Beschichtung müssten hier komplett demontiert, die alte PTFE-Schicht mechanisch entfernt und eine neue aufgebracht werden. Mit PTFE versehene Gewebefolien werden aktuell speziell zur Kunststofffensterherstellung genutzt, da die Fensterprofile viele scharfe Kanten besitzen und die PTFE-Schicht dadurch sehr häufig verletzt wird. Ein regelmäßiger Austausch der Folien ist hier notwendig. Das Glasgewebe in den Folien wirkt sich hier positiv auf die Standzeit im Prozess aus. Über Schnellspannvorrichtungen können die Folien schnell und problemlos getauscht werden, sobald diese nicht mehr funktionstüchtig sind. PTFE hat im Allgemeinen eine maximale Einsatztemperatur von 270°C. Die Nutzung von Antihaftsprays (Silikonspray, PTFE-Spray) ist nicht zugelassen, da hier Rückstände in der Schweißebene verbleiben die die Nahtqualität nachteilig beeinflussen können [DVS12-3, Ehr04, Hig13].

Eine Möglichkeit zur Detektion eines Verschmutzungsgrads oder eines Verschleißes der Antihafbeschichtung existiert derzeit nicht, obwohl Verunreinigungen auf dem Heizelement die Nahtqualität stark beeinflussen.

### 2.2.5. Zwischenfazit Heizelementstumpfschweißen

Bei der Anwendung aktueller Ansätze treten immer wieder folgende Defizite auf. Es existiert keine Sensortechnologie und keine entsprechenden Ansätze, die direkt in der Fügezone die thermodynamischen Vorgänge zwischen Heizelement und Kunststoff unmittelbar und ohne weitere komplexe theoretische Ansätze sichtbar machen können. Folglich wurden in nahezu allen Prozessphasen eigens theoretische Ansätze entwickelt, um eine Parameterfindung und Qualitätssicherung auf Basis von dezentral (bezogen auf die Fügeebene) eingebauten Kraft-, Weg- und Temperatursensoren zu realisieren (vgl. Abbildung 5). Die Verknüpfung dieser dezentral gewonnenen Messsignale mit den Geschehnissen in der Fügeebene, über die Nutzung vorwiegend der Restschmelzeschichtdicke, gestaltet sich jedoch in vielen Fällen sehr komplex.

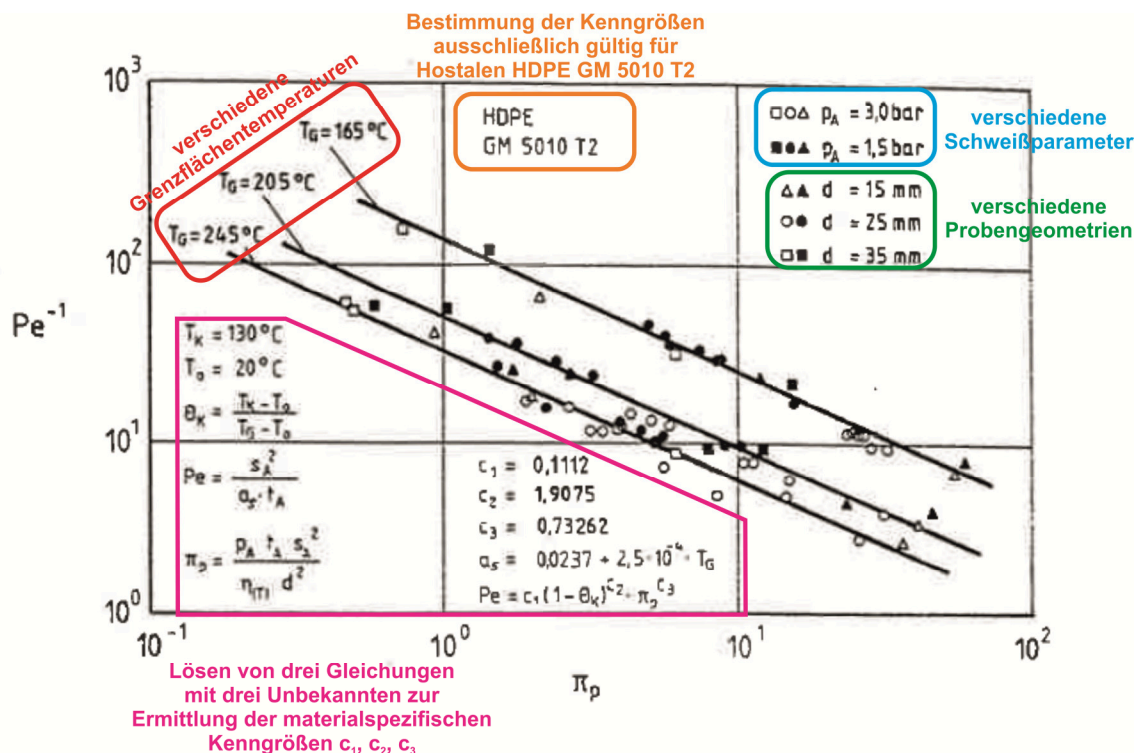


Abbildung 20: Darstellung zur Ermittlung der materialspezifischen Kennwerte  $c_1$ ,  $c_2$ , und  $c_3$  nach [Tap89]; Notwendige Kurvenverläufe, Parametervariationen, Temperaturen, Dimensionsvariationen

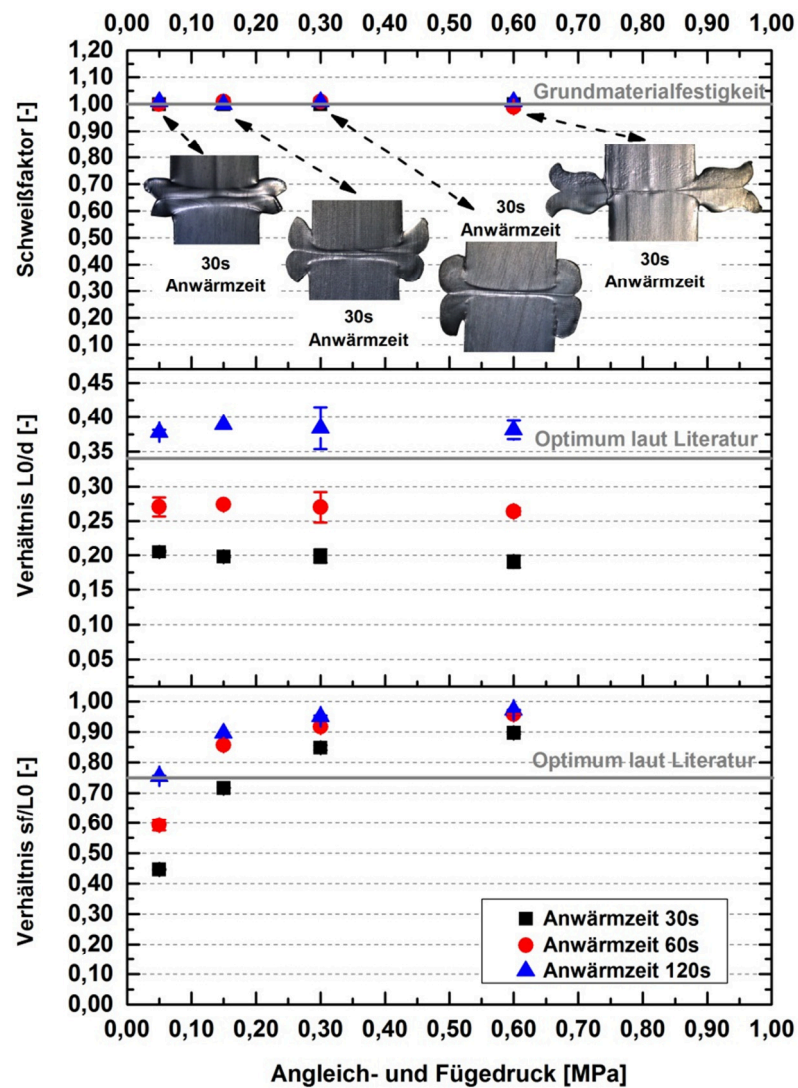
Es existieren diverse Hürden für eine Anwendung aktueller theoretischer Ansätze, wie beispielsweise die Bestimmung der materialspezifischen Größen  $c_1$ ,  $c_2$  und  $c_3$ , die Auswahl der richtigen Grenzflächentemperatur oder auch des richtigen  $\alpha_{\text{eff}}$ -Wertes. Abbildung 20 zeigt exemplarisch, welche Versuche mit welchen Parametern und Geometrievierungen für eine Ermittlung der dimensionslosen Kennzahlen notwendig sind. Wichtig ist, dass die ermittelten Kennzahlen dann trotzdem nur für ein Material nutzbar sind. Hinzu kommt noch, dass selbst, wenn diese Hürden gemeistert werden konnten, die Restschmelzeschichtdicke, je nach Polymer, sich doch als kein sicheres Kriterium zur Beurteilung, Optimierung und Überwachung des Schweißprozesses darstellt. Abbildung 21 zeigt exemplarisch eine Versuchsreihe mit Polyethylen, bei der die Angleich- und Fügedrücke variiert wurden. Auffällig ist, dass die in den vorigen Kapiteln beschriebenen Ansätze zur Parameterfindung und -optimierung hier nur eine eingeschränkte Gültigkeit haben.

## 2. Stand der Wissenschaft

---

In der Darstellung Schweißfaktor über Angleich- und Fügedruck (siehe Abbildung 21) ist zu erkennen, dass trotz starker Variation der Angleich- und Fügedrücke und der Anwärmzeiten sich zwar die Ausbildung der Restschmelzschichtdicke stark verändert hat, dies aber im Rahmen dieser Studie keine Auswirkungen auf die Festigkeit hatte. In Abbildung 21 ist exemplarisch die optische Auswertung für eine Anwärmzeit von 30s angezeigt. Äquivalente Beobachtungen können für eine Anwärmzeit von 60s und 120s getätigt werden. Da die beschriebenen Ansätze mit dem Verhältnis aus Schmelzschichtdicke und Wanddicke ( $L_0/d$ ) bzw. Fügeweg zu Schmelzschichtdicke ( $s_f/L_0$ ) arbeiten, wurden die Versuche wiederholt und hinsichtlich dieser Verhältnisse ausgewertet. In Abbildung 21 ist zu erkennen, dass mit zunehmender Anwärmzeit, sich das Verhältnis  $L_0/d$  unabhängig vom Angleichdruck, wie erwartet, steigt. Dies liegt alleinig in der verlängerten Anwärmzeit, in der mehr Material plastifiziert werden kann. Obwohl das Optimum (gemäß Abbildung 15) bei einem  $L_0/d$ -Verhältnis von 0,34 für teilkristalline Kunststoffe erwartet war, besitzen die Proben bei einem  $L_0/d$ -Verhältnis von 0,2 – 0,4 durchweg eine zufriedenstellende Festigkeit. Eine vergleichbare Beobachtung kann im letzten Diagramm erfolgen. Es ist das Verhältnis aus  $s_f/L_0$  dargestellt. Das Optimum sollte laut Literaturangaben (vgl. Abbildung 18) im Bereich von 0,75 für teilkristalline Materialien zu finden sein. Auch hier ist ersichtlich, dass alle Proben im Bereich von 0,4 – 1,0 eine zufriedenstellende Festigkeit aufwiesen. Alle in der Abbildung 21 dargestellten Ergebnisse wurden mit Mehrfachmessungen statistisch abgesichert.





Material	Probekörperabmaße	Heizele- ment- temperatur	Angleich- zeit	Angleich- druck	Anwärmzeit	Umstellzeit	Fügezeit	Fügedruck
	[mm]	[°C]	[s]	[MPa]	[s]	[s]	[s]	[MPa]
Po- lyethy- len	50 x 6	200	30	Siehe Gra- fik	20	< 5	300	Siehe Gra- fik

Abbildung 21: Darstellung der Ergebnisse einer Parametervariation für Polyethylen, erstes Diagramm Schweißfaktor über Angleich- und Fügedruck, zweites Diagramm L0/d über Angleich- und Fügedruck, drittes Diagramm sF/L0 über Angleich- und Fügedruck

## 2. Stand der Wissenschaft

---

Eine Abschätzung bezüglich der Einflussgrößen schließt aus, dass die Defizite zwischen den Versuchen aus Abbildung 21 und den aktuell publizierten und dargestellten Ansätzen rein in der Kraft- und Wegmessung zu finden sind. Sicherlich wurde die Genauigkeit und Robustheit von Sensoren über die Jahre verbessert, allerdings hat sich wenig an den Kalibrationsroutinen geändert. Folglich sind die Defizite in den Ansätzen selbst zu suchen, die Kraft- und Wegsignale versuchen zu nutzen, um auf Prozesse in der Fügezone zu schließen. Die Gründe hierfür sind sicherlich vielschichtig. Aber ein nicht von der Hand zu weisender Faktor wird in der Weiterentwicklung von Materialien und deren Herstellung gesehen. Dies kann anhand der Rezepturenentwicklung von Polyethylen im Rohrleitungsbau sehr gut verdeutlicht werden. Polyethylenrohre werden seit etwa 50 Jahren hergestellt. Zu Beginn wurden die Rohre für eine Lebensdauer von etwa 50 Jahren ausgelegt. Die Weiterentwicklung neuer Katalysatoren ermöglicht aktuell die Herstellung von lang- und kurzkettigen Polyethylenmolekülen. Moderne bimodale Polyethylene erreichen derzeit eine Lebensdauer von etwa 100 Jahren. Gleichzeitig können moderne Rohre mit einem höheren Betriebsdruck betrieben werden und sind gleichzeitig weniger spannungsrisseanfällig, was für moderne Verletechniken der Rohre wichtig ist [Ege13]. Daher existieren zwei mögliche Vorgehensweisen, die auf Basis aktueller Untersuchungen aus Abbildung 21 zielführend sind.

Es können zum einen die Ansätze zur Verknüpfung der Kraft- und Wegsensoren mit der Fügeebene überarbeitet werden oder es werden Weiterentwicklungen angestrebt, die versuchen, einen Sensoren direkt in der Fügeebene zu positionieren, so dass keine theoretischen Ansätze zur Übertragung der Sensorkennwerte in die Fügeebene mehr notwendig sind. Da ersteres bereits des Öfteren durchgeführt wurde und dennoch immer wieder an seine Grenzen gestoßen ist, sollte ein neuer Sensor zum Einsatz kommen, der nicht auf einer Kraft- und Wegaufzeichnung basiert, sondern direkt die thermodynamischen Vorgänge zwischen Heizelement und Fügepartner sichtbar macht. Eine Wärmestrombilanzierung unter Berücksichtigung hochtemperaturbeständiger Wärmestromsensoren direkt in der Fügezone soll erstmals die Möglichkeit bieten, aktuellen Defiziten dezentraler Messwerte entgegenzuwirken und zum anderen den grundlegenden Kennwert Wärmestrom erfassen. Der Wärmestrom zwischen Heizelement und Probe ist einer der zentralen Kennwerte, der bislang nur über theoretische Ansätze indirekt greifbar ist und nicht aktiv

gemessen werden kann. Dies soll erstmals möglich sein. Im nachfolgenden Kapitel wird daher der Stand der Wissenschaft bezüglich der Thematik hochtemperaturbeständiger Wärmestromsensoren näher erläutert.

## 3. Wärmestrombilanzierung mittels Wärmestromsensoren

### 3.1. Grundlagen der Wärmelehre

Ein wichtiges Teilgebiet der Wärmelehre beschäftigt sich mit der Wärmeübertragung und beschreibt die Gesetzmäßigkeiten, nach denen ein Austausch von Wärme zwischen Systemen unterschiedlicher Temperatur erfolgt. Ein permanentes Ziel bezüglich Anlagen und Apparaturen, die Wärme transferieren, ist, deren Effizienz zu erhöhen. Effizienter heißt, den Wirkungsgrad zu erhöhen, einen optimalen Einsatz von Energieressourcen bei gleichzeitig minimalen Umweltbelastungen zu realisieren und zeitgleich damit verbundene Kosten zu senken. Die Grundvoraussetzung für dieses Streben nach Effizienz ist die Kenntnis über die vorherrschenden Wärmeübertragungsvorgänge [Boc06]. In Anlehnung an die Postulierung von Nußelt aus dem Jahre 1915, werden zwei Arten der Wärmeübertragung unterschieden, Wärmeleitung und Strahlung. Wärmeleitung kann weiterhin unterteilt werden in Wärmeleitung in einem Festkörper oder ruhenden Fluid sowie Wärmeleitung von einer Oberfläche zu einem bewegten Fluid (Konvektion) [Boc06]. Abbildung 22 zeigt anhand dreier Darstellungen die zwei Arten der Wärmeübertragung [Kir07, Ven11].

Im nachfolgenden sind die wichtigsten Begriffe zu Wärmeübertragungsvorgängen aufgeführt, und kurz erläutert.

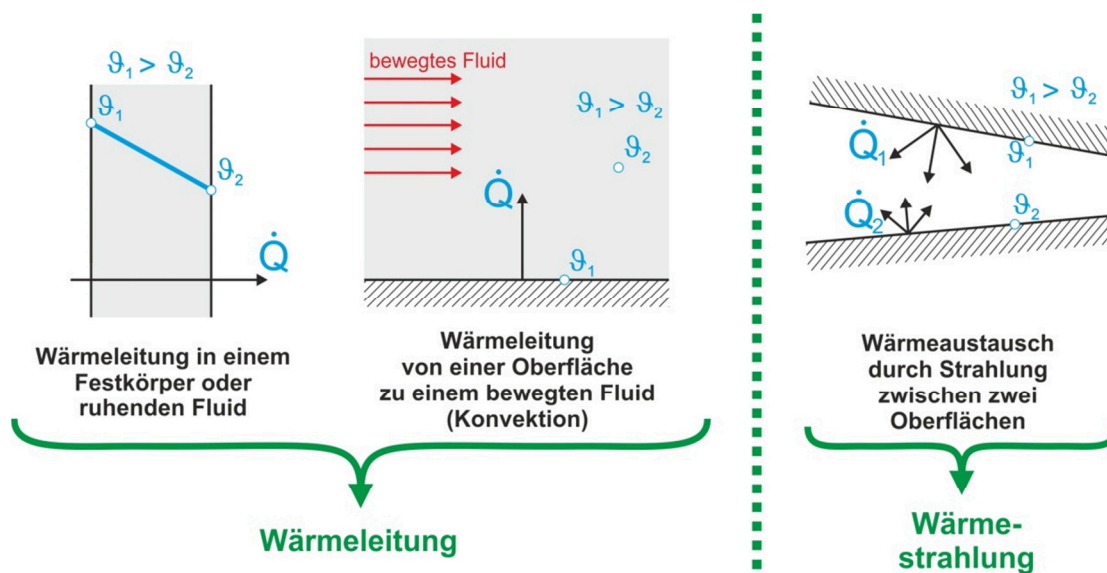


Abbildung 22: Darstellung der zwei Arten von Wärmeleitung  
[Boc06 (angepasst)]

#### 3.1.1.1. Wärmeleitung

Wärmeleitung innerhalb eines Stoffes bzw. Materials oder Bauteils kann nur erfolgen, wenn ein Temperaturgradient zu Grunde liegt. Die Berechnung der Wärmeleitung unterscheidet zwischen ruhenden Stoffen (feste Stoffe oder ruhende Fluide) und strömenden Fluiden. Die Wärmeübertragung in ruhenden Stoffen ist lediglich über den vorherrschenden Temperaturgradienten und die entsprechenden Stoffeigenschaften charakterisiert. Kann ein zeitlich konstanter Temperaturgradient und somit auch konstanter Wärmestrom aufrechterhalten bleiben, handelt es sich um stationäre Wärmeleitung. Ist dies nicht der Fall und es findet bedingt durch die Wärmeleitung ein Aufheizvorgang oder ein Abkühlprozess der Stoffe bzw. Materialien statt, handelt es sich um instationäre Wärmeleitung [Boc06, Lie11].

Ein stationärer Prozess kann gemäß der Gesetzmäßigkeit nach Fourier wie folgt beschrieben werden [Boc06, Lie11] (vgl. Gleichung 12 und Gleichung 13):

$$\dot{q} = \frac{d^2Q}{dA \cdot dt}$$

Gleichung 12

$$\dot{Q}_L = \frac{dQ}{dt} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{d\vartheta}{ds} = -a \cdot \rho \cdot c_p \cdot A \cdot \frac{d\vartheta}{ds}$$

Gleichung 13

In der bekannten Form ist  $\dot{q}$  die Wärmestromdichte, d.h. der lokale Wärmestrom  $\dot{Q}_L$  bezogen auf die Durchtrittsfläche  $A$  bzw. einem Zeitraum  $t$ .  $\lambda$  beschreibt die Wärmeleitfähigkeit des betreffenden Stoffes,  $\rho$  die Dichte,  $c_p$  die spezifische Wärmekapazität,  $s$  die Ortskoordinate, die normal, bzw. senkrecht, zur Durchtrittsfläche  $A$  gewählt wird und  $\vartheta$  die Wandtemperatur (vgl. Abbildung 22). Die lokale Wärmestromdichte ist demzufolge als vektorielle Größe dem negativen lokalen Gradienten des Temperaturfeldes direkt proportional [Boc06, Lie11].

Die Beschreibung eines instationären Prozesses erfolgt im Allgemeinen in der folgenden Form [Boc06] (vgl. Gleichung 14):

### 3. Wärmestrombilanzierung mittels Wärmestromsensoren

---

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial s^2} = a \nabla^2 \vartheta$$

Gleichung 14

Wie zu erkennen ist, bedient sich die Beschreibung eines instationären Wärmeleitprozesses einer dreidimensionalen Differenzialgleichung. Die Lösung für ein dreidimensionales Temperaturfeld ist, bis auf wenige Ausnahmen, nur über numerische Ansätze mit einem vertretbaren Aufwand lösbar [Boc06, Lie11].

Eine Wärmeleitung und somit ein Wärmetransport stellt sich ebenso zwischen einer festen Wand und einem strömenden Medium ein, sofern ein Temperaturgradient vorliegt. Dieser Wärmetransport ist dann allerdings charakterisiert durch die Wärmeleitung und die Temperaturgrenzschicht des Fluids, wobei Letztere wiederum von der Strömung des Mediums bzw. Fluids abhängt. Die sprachliche Trennung bezüglich eines Wärmeleitphänomens zwischen einem ruhenden Stoff und einem bewegten Fluid erfolgt über den etablierten Begriff der Konvektion. Unterschieden werden kann in diesem Zusammenhang noch zwischen freier und erzwungener Konvektion.

Bei freier Konvektion entsteht eine Strömung auf Grund eines Temperatur- und folglich eines Dichteunterschiedes in einem Fluid. Fluidschichten mit geringer Dichte beginnen aufzusteigen, solche mit größerer Dichte abzusinken. Die erzwungene Konvektion erfordert im Gegenzug dazu einen äußeren wirkenden Druck [Boc06, VDI06]. Die freie Konvektion soll im nachfolgenden kurz erläutert werden, da diese in einem Heizelementstumpfschweißprozess zum Tragen kommt. Die erzwungene Konvektion spielt hingegen nur eine untergeordnete Rolle und wird daher nicht näher behandelt.

Eine Beschreibung der freien Konvektion erfolgt über folgenden Zusammenhang [Boc06, Lie11, VDI06] (Gleichung 15):

$$\dot{Q}_K = A \cdot \alpha \cdot d\vartheta$$

Gleichung 15

### 3. Wärmestrombilanzierung mittels Wärmestromsensoren

---

Der über freie Konvektion übertragene Wärmestrom  $\dot{Q}_K$  ist direkt proportional zur Übertragungsfläche  $A$ , dem Wärmeübertragungskoeffizienten  $\alpha$  und der Temperatur zwischen Oberfläche, Feststoff und Fluid. Der Wärmeübertragungskoeffizient  $\alpha$  ist direkt proportional zur Nusselt-Zahl  $Nu$ , der Wärmeleitfähigkeit des Fluids und indirekt proportional zur angeströmten Länge [Boc06, Lie11, VDI06] (vgl. Gleichung 16).

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{l}$$

Gleichung 16

Die Nusselt-Zahl selbst errechnet sich über die Gleichung 17 [Boc06, Gül99, VDI06]:

$$Nu = \{0,825 + 0,387 \cdot [Ra \cdot f_1(Pr)]^{\frac{1}{6}}\}^2$$

Gleichung 17

Die Funktion  $f_1(Pr)$  berücksichtigt den Einfluss der Prandl-Zahl  $Pr$  im Bereich von  $0,001 < Pr < \infty$ , während sich die Rayleigh-Zahl  $Ra$  aus der Multiplikation von Grashofzahl  $Gr$  und Prandtl-Zahl  $Pr$  zusammensetzt [Boc06, VDI06] (vgl. Gleichung 18 bis Gleichung 20).

$$f_1(Pr) = \left[ 1 + \left( \frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{-\frac{16}{9}}$$

Gleichung 18

$$Ra = Gr \cdot Pr$$

Gleichung 19

$$Gr = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta\vartheta$$

Gleichung 20

#### 3.1.1.2. Wärmestrahlung

Die Wärmeübertragung durch Strahlung unterscheidet sich grundlegend von der Wärmeübertragung durch Wärmeleitung. Wärmeleitung nutzt Bewegungen auf molekularer Ebene innerhalb eines Stoffes. Für eine Wärmeleitung ist ein Trägermedium notwendig, welches sich thermisch anregen lässt. Wärmestrahlung hingegen erfolgt über elektromagnetische Wellen, die ausgesandt werden und keine Materie benötigen. Der Wärmetransport über Strahlung kann sowohl von der Oberfläche fester als auch flüssiger Körper im Vakuum oder durch gasförmige Stoffe mit mehr als zwei Atomen erfolgen. Die Wellenlängen der elektromagnetischen Wellen bewegen sich im Bereich von 0,8 bis 400  $\mu\text{m}$  (ultraroter Wellenbereich). Elektromagnetische Wellen, die auf einen Körper treffen, können von diesem reflektiert (Reflektion), absorbiert (Absorption) oder hindurchgelassen (Transmission) werden. Die Addition aus Reflektionsverhältnis, Absorptionsverhältnis und Transmissionsverhältnis ist immer eins [Bor06, VDI06].

Jeder Körper, dessen Temperatur sich über dem absoluten Nullpunkt befindet, sendet Strahlung aus. Ein Körper, der in der Lage ist, bei einer bestimmten Temperatur mit maximaler Intensität zu strahlen, wird als schwarzer Körper bezeichnet und besitzt den Emissionsgrad Eins. Alle anderen Körper, die eine geringere Intensität ausstrahlen, weisen folglich einen Emissionsgrad kleiner Eins auf. Der Wärmestrom  $\dot{Q}_S$ , der durch Strahlung übertragen wird, errechnet sich über folgende Beziehung [Bor06, Lie11] (vgl. Gleichung 21):

$$\dot{Q}_S = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4$$

Gleichung 21

Der Wärmestrom  $\dot{Q}_S$  ist somit direkt proportional zum Emissionskoeffizienten  $\varepsilon$ , der Stefan-Boltzmann-Konstante  $\sigma$  (Stefan-Boltzmann-Konstante  $(5,6696 \pm 0,0075) \cdot 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ), der betrachteten Oberfläche  $A$  und zur Temperatur des Strahlers  $T$  in der vierten Potenz.



#### 3.2. Aufbau und Funktion von Wärmestromsensoren

Einer der ersten Sensoren, der den so genannten thermoelektrischen Effekt nutzte und somit als Wärmeflussensor bezeichnet wurde, stammt von Gardon und ist als "Gardon gauge" bekannt. Eine der zugehörigen Veröffentlichungen ist auf das Jahr 1953 datiert. Dieser Sensor bestand aus einer dünnen Konstantanfolie, welche auf einen massiven Kupferrahmen gelötet war. Der Kupferrahmen bildete eine Wärmesenke und wurde in guten thermischen Kontakt zur Messoberfläche gebracht. Ein Wärmefluss induzierte eine Temperaturdifferenz und damit eine Thermospannung zwischen der Konstantanfolie und dem Kupferrahmen. Der Abgriff der Spannung erfolgte über zwei Kupferdrähte, einer davon an der Konstantanfolie und der andere am Kupferrahmen. Der Grund für diesen Aufbau war die Messung eines Strahlungsflusses großer Intensität ( $> 10^4 \text{ W/m}^2$ ). Der Einsatz von dünnen Konstantanfolien ermöglichte hier zwar sehr kurze Zeitkonstanten bezüglich der Reaktion des Sensors auf thermische Strahlungen, jedoch war die Empfindlichkeit sehr gering [Bal85, Ewi10, Hub08, Hub09, Hub11, Mey07].

Eine erste Version eines Wärmestromsensors, wie dieser aktuell verstanden wird, stammt von Hager Mitte der 60er Jahre [Mey07]. Hager nutzte zur Temperaturdifferenzmessung eine Serienschaltung von Thermoelementen aus Mikrodrähten, welche in Kunststoff eingebettet waren. Eine Temperaturdifferenz induzierte entsprechend der Anzahl der Thermoelemente eine relativ starke Thermospannung [Mey07].

Wärmestromsensoren nutzen, allgemein ausgedrückt, das Prinzip der Thermoelektrizität. Thermoelektrische Effekte werden immer dann beobachtet, wenn zwei Materialien mit unterschiedlichen Seebeck-Koeffizienten in Kontakt gebracht werden. Beispielsweise basiert hierauf auch die klassische Temperaturmessung mittels Thermodrähten. Abbildung 23 zeigt den Seebeck-Effekt schematisch dargestellt. In einer Schleife, bestehend aus zwei unterschiedlichen elektrischen Leitern A und B, initiiert sich ein elektrischer Strom  $I$ , sobald an den Verbindungsstellen der beiden Leiter unterschiedliche Temperaturen  $T_1 \neq T_2$  herrschen.

### 3. Wärmestrombilanzierung mittels Wärmestromsensoren

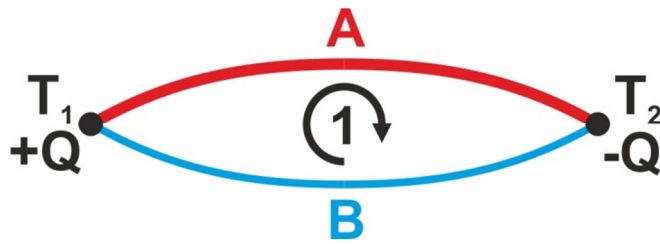


Abbildung 23: Schematische Darstellung des Seebeck-Effekts [Ber04]

Die Polarität des Leiters A ist positiv gegenüber des Leiters B, wenn an der kälteren Verbindungsstelle der Elektronenfluss von A nach B stattfindet.

Der Strom I wird initiiert

durch eine „integrale“ Thermo-EMK (EMK = elektromotorische Kraft)  $U_{A/B}$ , die auch bei einer offenen Leiterschleife mit  $I=0$  existent ist (vgl. Gleichung 22).  $S_{A/B}$  ist in diesem Falle die differenzielle Thermo-EMK oder auch der relative Seebeck-Koeffizient der Leiterkombination A/B [Bal85, Ber04, Ewi10, Hub08, Hub09, Hub11].

$$U_{A/B} = S_{A/B} \cdot (T_1 - T_2)$$

Gleichung 22

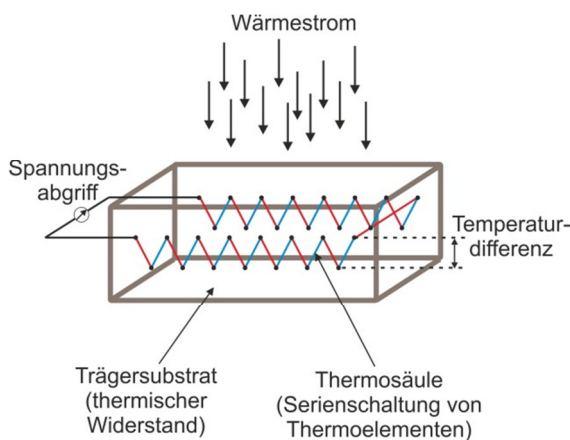


Abbildung 24: Aufbau eines Wärmestromsensors unter Ausnutzung des Seebeck-Effekts [Mey07, angepasst]

Wärmestromsensoren, wie sie in dieser Arbeit zur Anwendung kommen, nutzen ebenfalls den Seebeck-Effekt und bestehen im allgemeinen aus einer gezielten Schaltung von Thermoelementen zu sogenannten Thermosäulen. Thermosäulen sind eine Kette von elektrisch in Serie und thermisch parallel geschalteten Thermoelementen, welche sich in einer Trägerplatte, meist aus Kunststoff oder Keramik, eingebettet befinden. Eine Temperaturdifferenz zwischen Vorder- und

Rückseite der Trägerplatte induziert einen Wärmefluss. Die Anordnung der Thermosäule erfolgt so, dass die Temperaturmessstellen der einzelnen Thermoelemente alternierend in der Nähe einer der Oberflächen zum Liegen kommen. Durch die elektrische Serienschaltung der einzelnen Thermoelemente addieren sich die Thermospannungen der Thermoelemente [Bal85, Hub08, Ewi10, Hub09, Hub11, Mey07, Wrb12]. Abbildung 24 zeigt den Aufbau eines

Wärmestromsensoren. Die Addition der Thermospannungen ermöglicht eine Verstärkung des Messsignals, was mit einer Steigerung der Genauigkeit und Empfindlichkeit annähernd gleichzusetzen ist. Die Besonderheit und damit auch der Vorteil dieser Wärmestromsensoren liegen darin, dass diese den Wärmestrom über die Thermosäule im Durchgang messen und gleichzeitig über zusätzliche einzelne Thermoelemente unabhängig der Thermosäule eine zeitgleiche Ermittlung der Sensortemperatur ermöglichen. Weiterhin können Wärmestromsensoren beliebig geschaltet werden, sodass der Wärmestrom flächig über ein Bauteil ermittelt wird oder eine lokale Aufzeichnung des Wärmestroms an definierten Stellen erfolgen kann [Bea88, Ewi10, Hub08, Hub09, Hub11, Mey07].

Es existieren diverse Möglichkeiten, den Wärmestrom zu bestimmen. Hier sei auf die einschlägige Literatur verwiesen. Vor allem sei an dieser Stelle auf die zahlreichen und häufig zitierten Werke von Thomas E. Diller (Virginia Polytechnic Institute and State University) und J. M. Hager (Vatell Corporation) zum Thema „heat flux measurement“, „heat flux calibration“ oder „heat transfer“ verwiesen.

#### 3.3. Einsatzbereiche von Wärmestromsensoren

Derzeit kommen Wärmestromsensoren gemäß dem Aufbau nach Hager in vielen Bereichen der Industrie zum Einsatz, um vielfältigste Aufgaben zu erfüllen. Beispielsweise werden Wärmestromsensoren genutzt, um Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) von verschiedensten Strukturen (Wände, Fenster, Böden etc.) zu ermitteln [Huk13, Las92, Pul10, Seq12, Wun11]. Ein weiterer Einsatzbereich von Wärmestromsensoren stellt den Einsatz in Gasturbinen dar. Mit Hilfe dieser Sensoren werden gezielt Rückschlüsse auf die Effizienz der Gasturbine und die Wahl der eingesetzten Materialien und Geometrien der Turbinenschaufeln gezogen. Mit Hilfe der Sensoren kann bestimmt werden, ob am aktuellen Betriebspunkt mit den jeweiligen Turbinengeometrien ein laminarer oder ein turbulenter Luftstrom im Bereich der Turbinenschaufeln entsteht. Ein laminarer Strom bedeutet wenige Verwirbelungen der Luft in der Turbine und stellt die Voraussetzung einer effizienten Turbine dar. Beispielsweise bewirkt ein laminarer Luftstrom eine maximale Wärmeabfuhr an das Medium Luft und somit einen maximalen Wärmestrom. Auch werden gezielt Kühlungen von Verbrennungsmotoren und Turbinen

### 3. Wärmestrombilanzierung mittels Wärmestromsensoren

---

mit solchen Systemen untersucht und optimiert. Denn beispielsweise leidet bei einer Gasturbine mit zunehmender Kühlung die Effizienz. Allerdings ist eine Kühlung notwendig, um das System vor einer Überhitzung schützen zu können. Hier werden derzeit mit Hilfe von Wärmeströmen optimale Betriebspunkte gesucht [Bec07, Her08, Mes12, Nag06, Neu92, New08, Pul10, Pul11, Rei02, Wun11]. Wärmestromsensoren werden auch im Bereich von Verbrennungsanlagen an und um Brennkessel von Heizkraftwerken eingesetzt. Sie detektieren Leckagen, Korrosionen und fungieren somit als Überwachungssensoren. Tiefergehende Recherchen [Per92] haben sogar gezeigt, dass über eine Wärmestrombilanzierung ein Autoklavensystem beim Aushärten von faserverstärkten Kunststoffen aktiv über den Kennwert Wärmestrom geregelt wurde und somit eine gezieltere, gleichmäßigere und deutlich schnellere Aushärtung der glasfaserverstärkten Bauteile erreicht werden konnte [Atk82, Bec10, Ewi10, Gra11, Hub08, Hub09, Hub11, Kru07, Pul10, Spi09, Wun11].

#### 3.4. Einsatzgrenzen aktueller Sensoren

Der Einsatz aktueller Sensoren wird derzeit meist durch die maximale Einsatztemperatur limitiert. Die Gründe hierfür sind vielschichtig und oftmals in der Literatur nicht beschrieben. Die im Rahmen dieser Arbeit getätigten Recherchen bezüglich Wärmestromsensoren zeigen, dass der hauptsächliche Grund für die geringe Temperaturstabilität vieler Sensoren im verwendeten Trägermaterial liegt. Die Trägersubstanz soll die Eigenschaft der guten thermischen Leitfähigkeit mit einer gleichzeitig schlechten elektrischen Leitfähigkeit vereinen. Als Isolationswerkstoff gegen elektrische Effekte wird in diesem Falle oftmals ein polymeres Material eingesetzt. Die thermische Leitfähigkeit wird dadurch erreicht, dass das Kunststoffsegment sehr dünn als Folie verbaut wird und der Kunststoff entsprechend additiviert ist. Oftmals werden die Thermosäulen auch direkt auf eine Kunststofffolie aufgedruckt. Ein solcher Wärmestromsensor ist somit nur kurzzeitig und erst recht nicht für Hochtemperaturanwendungen jenseits von 200°C einsetzbar. Die klassische Schweißtemperatur beim Fügen von Kunststoffen mit dem Heizelementstumpfschweißverfahren liegt im Bereich von 200°C – 300°C und lässt viele Sensoren ausscheiden. Dennoch existieren kommerzielle Ansätze, die sich darauf spezialisiert haben, hochtemperaturbeständige Sensoren zu bauen. Der Unterschied zu weniger temperaturstabilen Sensoren besteht in erster Linie darin, dass statt einem polymerbasierten Trägersubstrat eine hochwärmeleitfähige keramische

Masse verwendet wird. So sind die Wärmestromsensoren bis mindestens 300°C dauerhaft einsetzbar. Exemplarisch wurden im Rahmen dieser Arbeit Sensoren der Fa. MesoScribe Technologies Inc. (USA) und der Fa. ITI Company (USA) genutzt. Die Sensoren und der verwendete Versuchsaufbau sind im Abschnitt 6.5 näher erläutert [Bal85, Chi99, Ewi10, Fra02, Hub09, Hub11, ITI11, Pul10].

#### 3.5. Kalibration von Wärmestromsensoren

##### 3.5.1. Allgemeine Situation

Recherchen zum Thema Kalibration von Wärmestromsensoren zeigen eine Vielzahl an Möglichkeiten auf, eine Kalibrationsvorrichtung zu gestalten und eine Kalibration durchzuführen [Dil99, Huk99, Mey07, Moc09, NIS05, Pull11, Suj05]. Prinzipiell können Kalibrationsmethoden in zwei Bereiche, so genannte primäre und sekundäre Kalibrationsmethoden, eingeteilt werden. Primäre Methoden nutzen die Rückführbarkeit eines Wärmestroms auf elektrische Leistungsmessungen, während sich sekundäre Methoden dem Vergleich zu kalibrierten Referenzwärmestromsensoren oder einer Rückführung auf Temperatur-Differenzmessungen bedienen [Hof06, ISO91, Med03, Mey07, Moc09, Mur05, Tfx10].

Ein Beispiel für eine primäre Methode ist die Guarded Hot Plate Methode. Abbildung 25 zeigt einen typischen Guarded Hot Plate Aufbau, der kommerziell verfügbar ist. Der hier dargestellte Aufbau ist in erster Linie dazu bestimmt, einen definierten Wärmestrom zu erzeugen und damit die Wärmeleitfähigkeit unbekannter Substanzen zu bestimmen. Dieser definierte Wärmestrom kann aber auch verwendet werden, um Wärmestromsensoren zu kalibrieren. Das im Aufbau als Hot Plate bezeichnete Heizsegment ist zusammen mit dem Guard Heater zwischen zwei möglichst identischen Probematerialien eingespannt. Die als Auxiliary Heaters bezeichneten Plattensegmente/Heizelemente sind jeweils über wie auch unter der Probe angeordnet. Während das zentrale Heizsegment (Hot Plate) auf eine fixe Temperatur gebracht wird, werden die Auxiliary Heaters so geregelt, dass sich ein definierter Temperaturgradient einstellt. Der Temperaturgradient ist benutzerabhängig und simuliert den Temperaturgradienten im Einsatzfall. Sobald das thermische Gleichgewicht zwischen der Hote Plate und dem Auxiliary Heater erreicht ist, erfolgt die Auswertung der Messung unter Einbeziehung der Gesetzmäßigkeit

### 3. Wärmestrombilanzierung mittels Wärmestromsensoren

nach Fourier aus Abschnitt 3.1. (Gleichung 13) und dem Zusammenhang, dass der Wärmefluss  $\dot{Q}$  sich über das Verhältnis der Heizleistung  $P_{elektrisch}$  und der Fläche der Heizung  $A_{Heizung}$  errechnet (vgl. Gleichung 23).

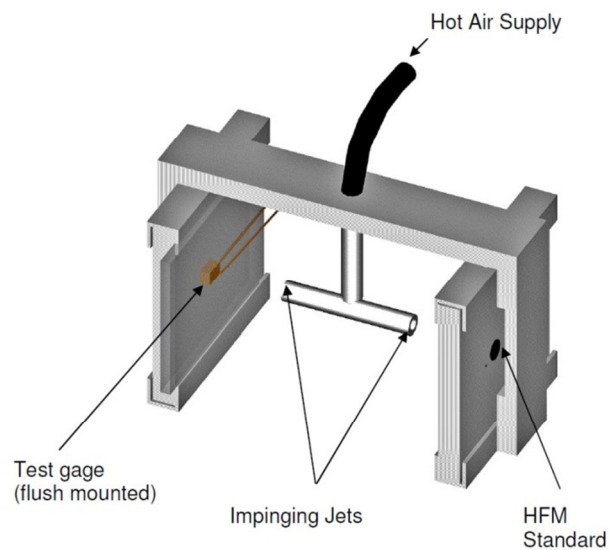
$$\dot{Q} = \frac{P_{elektrisch}}{A_{Heizung}}$$

Gleichung 23



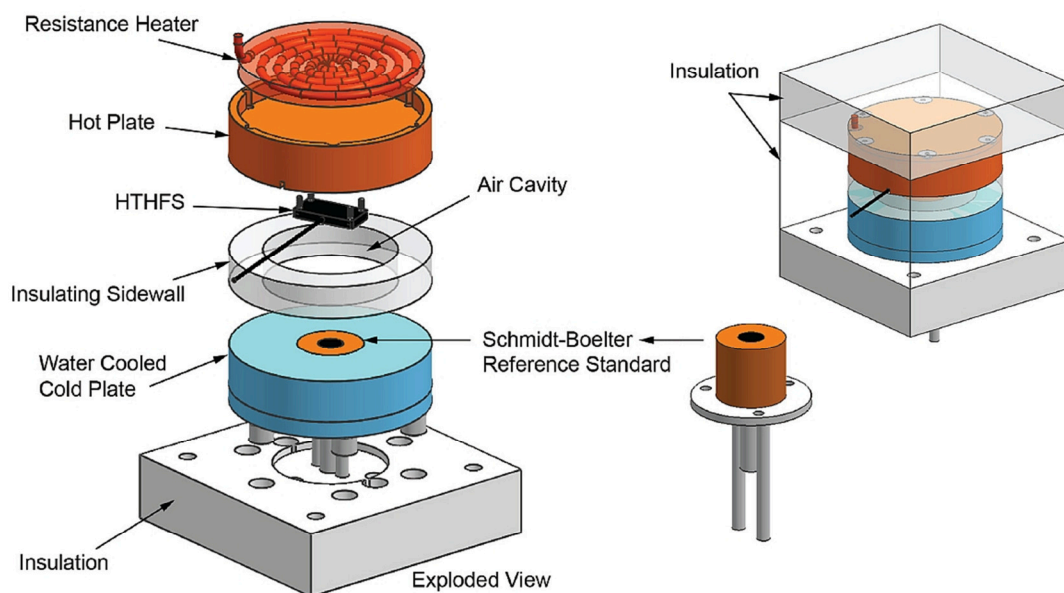
Abbildung 25: Guarded Hot Plate Fa. Netzsch-Gerätebau GmbH [Net13]

Die sekundäre Methode bedient sich, wie bereits erwähnt, einem Vergleich mit bekannten Referenzmaterialien oder Wärmestromsensoren oder nutzt die Rückführung auf eine Temperatur-Differenzmessung. Die Rückführung auf einen bereits kalibrierten Wärmestromsensor zeigt Abbildung 26. Der definierte Wärmestrom wird in diesem Beispiel über ein erwärmtes Gas generiert. Das warme Gas wird eingeleitet, auf zwei Ströme aufgeteilt und einmal auf einen bereits kalibrierten und zum anderen auf einen unkalibrierten Sensor geleitet. Die Kalibration erfolgt über den Abgleich des unkalibrierten mit dem kalibrierten Sensor. Über die Änderung der Gastemperatur können verschiedene Wärmeströme eingestellt werden und die Sensoren über einen weiten Wärmestrombereich kalibriert werden.



**Abbildung 26: Kalibrationsaufbau für Wärmestromsensoren, Generieren eines Wärmestroms über Konvektion [Suj05]**

Ein weiterer Kalibrationsaufbau, der speziell für hochtemperaturbeständige Wärmestromsensoren generiert wurde, veranschaulicht Abbildung 27.



**Abbildung 27: CAD-Model eines Kalibrationssystems für hochtemperaturbeständige Wärmestromsensoren [Pul11]**

Im Unterschied zur Guarded Hot Plate stellt das zentrale Segment dieses Aufbaus die zylinderförmige Kavität (Air Cavity) dar, welche von zwei horizontalen Platten (Hot Plate und Cold Plate) begrenzt ist. Die Kavität bestimmt den Abstand  $L$  dieser Platten. Wichtig für die Messung ist, dass die Temperatur der Innenseiten der beiden horizontal verlaufenden Platten über die Messung konstant gehalten wird. Die Kavität selbst ist während der Messung mit Luft gefüllt. Ziel ist es, innerhalb der Kavität eine definierte Strahlung zu erzeugen, mit der der Wärmestromsensor auf der heißen Platte (Hot Plate) kalibriert werden kann. Als Referenzsensor dient ein permanent mit Wasser gekühlter Schmidt-Boelter-Wärmestromsensor, der in die kalte Platte integriert ist und dessen Kennlinie bekannt ist. Um eine konstante Wärmestrahlung zu erzeugen, ist die Innenseite der Kavität nach innen hin verspiegelt und nach außen mit einer starken Isolationsschicht versehen. Sowohl die verspiegelte Seite als auch die Isolation haben den Hintergrund, dass so eine homogene Wärmestrahlung aufrechterhalten werden kann und die Verlustwärmeströme nach außen minimiert werden. Um Konvektionseffekte in der Kavität zu unterbinden, sind der gekühlte Aufbau unten und die heißen Segmente oben angebracht [Amo06, Bal85, Hof06, Moc09, Tsa04, Pul11].

Wie bereits erwähnt, sind die Möglichkeiten zur Kalibration eines Wärmestromsensors mannigfaltig. Der Grund hierfür ist, dass der Kalibrationsaufbau den späteren Einsatzfall so genau wie möglich nachbilden sollte. Hierzu zählen insbesondere die Art der Wärmestromerzeugung und die Einbausituation des Sensors [Bal85, Dil99, Che03, Huk99, Mey07, Moc09, NIS05, Pull11, Suj05, Tsa04].

#### 3.5.2. Kalibration im Heizelementstumpfschweißprozess

Wie bereits erwähnt, spielt sowohl die Einbausituation des Sensors als auch die Erzeugung des Wärmestroms für die Kalibration eine wichtige Rolle und sollte möglichst nahe an den Einsatzfall angelehnt sein. Änderungen in der Bauform und der Erzeugung des Wärmestroms wirken sich unmittelbar auf die Richtigkeit der gemessenen Wärmeströme aus und bedingen Anpassungen an eine Kalibration [Huk99, Pull11]. Abbildung 28 zeigt stark vereinfacht, welche Größen beim Schweißen von Kunststoffen in eine Kalibration der Sensoren einbezogen werden müssten. Es ist dargestellt, dass im Falle einer Heiz-

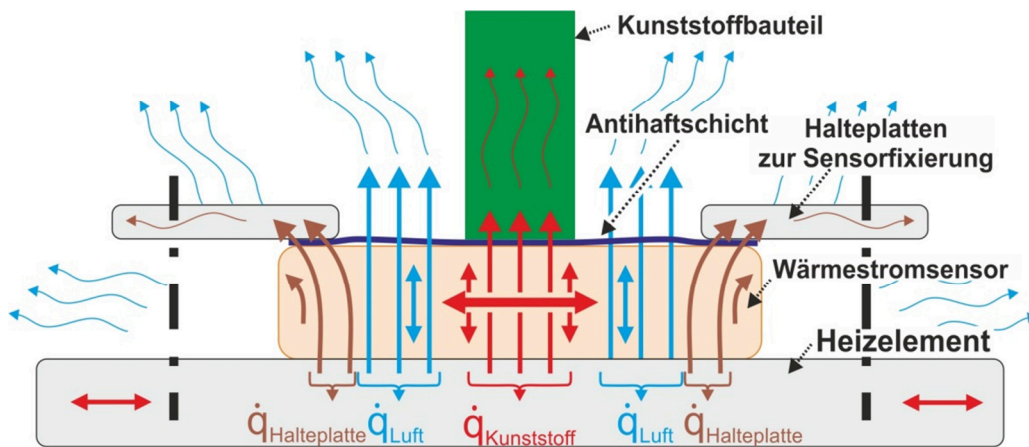


elementstumpfschweißung unterschiedlichste Wärmeströme vorherrschen, wie beispielsweise die Wärmeströme vom Heizelement kommend in den Sensor, zur Kunststoffprobe aber auch in die Spannvorrichtung und zur Antihaftbeschichtung. Weiterhin entstehen an jedem Bauteil Konvektionserscheinungen, die Verlustwärmeströme produzieren. Wird jetzt ein Kunststoff zur Plastifizierung in Kontakt mit diesem Aufbau gebracht, kommt eine Dynamik des Wärmestroms hinzu, die, verursacht durch schnell ändernde Temperaturgradienten, kaum beherrschbar ist, zumal sich die Kennwerte wie Temperaturleitfähigkeit oder auch Wärmeleitfähigkeit lokal im Bereich des Anlagepunktes auf Grund der Temperaturschwankungen permanent ändern. Vor allem während des Angleichens des Kunststoffes kann nicht von einer reproduzierbaren und gleichmäßigen Plastifizierung gesprochen werden, weil der Kunststoff relativ undefiniert das Heizelement berührt. Weiterhin entsteht in Folge der Plastifizierung ein Wulst, der zur Dynamik des Prozesses weiter beiträgt. Es entsteht ein Kollektiv, welches nur als Gesamtes betrachtet werden kann und es sich höchst kompliziert gestaltet, rein den Wärmestrom vom Heizelement in die Probe gesondert zu betrachten. Auch die Wechselwirkungen der einzelnen Baugruppen tragen zur Komplexität der Bilanzierung bei.

Vor allem vor dem Hintergrund, dass Wärmestromsensoren ohnehin eine individuelle Trägheit besitzen und je nach Masse und verwendeten Materialien für den Sensorbau auf wechselnde Wärmeströme mehr oder minder träge reagieren. Dynamische Effekte, bedingt durch Schwankungen im Wärmestrom, verursachen einen mehr oder minder starken und nur schwer bestimmbaren Offset des Messwerts. Je stärker und schneller die Temperaturschwankungen, je höher der thermische Widerstand und je höher die Wärmekapazität des Sensors selbst ist, desto größer ist dieser Offset. Selbst Hersteller solcher Sensoren besitzen derzeit keine Musterlösung, ein solches Kollektiv so aufzulösen, dass eine vergleichbare Vielzahl an Einflussgrößen bei der Kalibration berücksichtigt werden kann [Dil99, Huk99, Mey07, NIS05, Pull11, Suj05].

### 3. Wärmestrombilanzierung mittels Wärmestromsensoren

---



**Abbildung 28: Stark vereinfachte Darstellung eines realen Versuchsaufbaus unter Berücksichtigung der auftretenden Wärmeströme und Konvektionserscheinungen**

Lösungsansätze sehen vor, beispielsweise über Vergleichswärmestromsensoren diese Problematik eingrenzen zu können oder auch beispielsweise über gezielte Aufbauten (z.B. Sandwichaufbauten [Huk99]) den Sensor so zu gestalten, dass Wärmeleiteffekte innerhalb eines Sensors quer zur Messrichtung bereits durch hochleitfähige Deckschichten größtenteils unterbunden werden [Huk99].

#### 3.6. Zwischenfazit Wärmestrombilanzierung mittels Wärmestromsensoren

Recherchen haben ergeben, dass kommerziell erhältliche Wärmestromsensoren aktuell in einer Qualität und Temperaturstabilität hergestellt werden können, die einen Einsatz in einem Heizelementstumpfschweißprozess ermöglichen. Ebenso rechtfertigen und motivieren die aufgeführten Beispiele hinsichtlich aktueller Einsatzbereiche von Wärmestromsensoren in Turbinen, Autoklaven und Brennkesseln und die dort offengelegten Optimierungspotentiale den Einsatz dieser neuartigen Sensoren für den Heizelementstumpfschweißprozess zur Bilanzierung des eigentlichen Schweißprozesses und den relevanten Prozessphasen des Schweißens. Derzeit ist der Einsatz von Wärmestromsensoren noch nicht für das Heizelementstumpfschweißen erfolgt.

## 4. Herausforderungen und Chancen einer Inline-Wärmestrombilanzierung

### 4.1. Herausforderungen

Die Herausforderungen bezüglich einer Inline-Wärmestrombilanzierung können in zwei Bereiche eingeteilt werden. Zum einen betrifft dies die konstruktive Auslegung des Sensors und des Heizelements sowie die Integration des Sensors in den Fügeprozess. Der zweite Bereich bezieht sich auf die Aufzeichnung, Auswertung und Deutung des Messsignals des Wärmestromsensors.

Da der Sensor sich im Messaufbau direkt auf dem Heizelement befindet oder in das Heizelement integriert wird und auf diesem der Kunststoff in der Angleich- und Anwärmphase direkt plastifiziert werden soll, muss der Sensor so ausgeführt werden, dass dieser im besten Falle direkt auf das Heizelement beispielsweise aufgeschraubt werden kann. Nur so ist ein dauerhafter temperaturunabhängiger Kontakt zum Heizelement gewährleistet. Weiterhin muss der Sensor so beschaffen sein, dass dieser auf der Seite zum Kunststoff hin mit einer PTFE-Schicht versehen und im Falle eines Defektes der PTFE-Schicht nicht von der Kunststoffschmelze infiltriert und zerstört werden kann. D.h. der Sensor muss jeder Zeit neu mit PTFE beschichtet oder beklebt und im Falle einer Verunreinigung mit plastifiziertem Material ebenso gereinigt werden können wie das Heizelement in seiner Grundform ohne den Sensoraufbau. Konstruktiv muss der Sensor weiterhin so ausgelegt werden, dass er einer Zug-Druck-Wechselbeanspruchung bei einer Einsatztemperatur von bis zu 300°C standhält. Die Druckbeanspruchungen werden vorwiegend im Moment der Anlage des Kunststoffes vorliegen. Im Moment der Anlage des noch kalten Kunststoffes auf dem Sensor können lokal Kraftspitzen auftreten. Der zur Anlage gebrachte Kunststoff kann gleichzeitig scharfe Kanten und Unebenheiten besitzen, die die Oberfläche des Sensors nicht verändern, sprich verkratzen dürfen. Über mehrere Sekunden oder Minuten muss der Sensor in der Angleichphase einem konstanten Druck von mindestens einem MPa widerstehen. In der Umstellphase wird der Kunststoff vom Heizelement, bzw. dem Sensor, abgezogen und es entstehen Zugspannungen im Sensoraufbau ebenfalls von mindestens einem MPa. Können diese Kriterien konstruktiv nicht gelöst werden, ist der Einsatz der Sensoren im Schweißprozess nicht realisierbar.

#### 4. Herausforderungen und Chancen einer Inline-Wärmestrombilanzierung

---

Können die Sensoren erfolgreich in den Schweißprozess integriert werden, müssen die Messwerte des Sensors aufgezeichnet, ausgewertet und gedeutet, sprich eine Wärmestrombilanzierung für den Prozess generiert werden. Die Herausforderung der Wärmestrombilanzierung besteht darin, dass die generierten Messwerte reproduzierbar und qualitativ so hochwertig sein müssen (Ansprechzeit / Reaktionszeit im ms-Bereich, zulässige Beanspruchung größer als Schweißkraft), dass diese mit möglichst hoher Sicherheit und geringem Interpretationsspielraum ausgewertet werden können. Dies ist die Grundvoraussetzung für eine teil- oder vollautomatisierte Auswertung des Messsignals und somit auch Grundlage für eine zuverlässig funktionierende und praxisgerechte Inline-Qualitätskontrolle auf Basis der Wärmestrombilanzierung. Es müssen bezüglich der Auflösung des Messsignals klare Zusammenhänge erkennbar sein zwischen Wärmestrombilanzierung und beispielsweise den eingestellten Schweißparametern, vorwiegend den Zeiten und Temperaturen im Prozess. Zudem ist zu überprüfen, dass der Wärmestromsensor durch seinen Aufbau und thermischen Widerstand den Schweißprozess nicht nachteilig beeinflusst und beispielsweise zu verlängerten Zykluszeiten oder schlechteren Nahtqualitäten führt.

Beide dargestellten Themenkomplexe, einerseits zur Integration des Sensors und zum anderen zur Auswertung des Messsignals, wechselwirken in hohem Maß miteinander und können nicht unabhängig voneinander betrachtet werden. Denn je Robuster der Sensor beispielsweise ausgeführt ist, desto langsamer reagiert er und desto schlechter ist die Auflösung des Messsignals. Dennoch muss der Sensor so stabil sein, dass die Zug-Druckbeanspruchungen den Sensor nicht deformieren und das Messsignal nachteilig beeinflussen oder sogar den Sensor zerstören können. Unwirtschaftlich ist in jedem Falle der Tausch bzw. die Wartung der Sensoren unabhängig vom Grund der Wartung oder des Austausches. Denn dies kann nur während eines Produktionsstillstandes durchgeführt werden. Die Schweißmaschine muss abgeschaltet, der Sensor getauscht und das Gesamtsystem wieder angefahren und temperiert werden. Solche Produktionsausfälle sind vor allem in der Serienfertigung nur in extremen Ausnahmefällen tolerierbar. Hinzu kommt noch, dass der Sensor ein Kostenfaktor ist, was die Kalkulation beeinflusst, vor allem wenn trotzdem noch Kraft- und Wegsensoren im Schweißprozess notwendig sind.

### 4.2. Chancen

Die Chancen der Wärmestrombilanzierung basieren, ähnlich der Herausforderungen, auf zwei wesentlichen Ansätzen. Zum einen nutzt die Wärmestrombilanzierung einen Sensor, der sich direkt in der Fügeebene befindet und zum anderen dessen Messsignal, welches direkt auf thermodynamischen Vorgängen beruht.

Der Ort des Generierens des Messwertes ist entscheidend dafür, wie aussagekräftig der Messwert bezüglich der jeweiligen durchgeführten Schweißung ist. Mit Hilfe von hochtemperaturbeständigen Wärmestromsensoren entfällt zum einen das Defizit, dass dezentral gemessene Signale mit den Vorgängen in der Fügezone erst korreliert werden müssen und zum anderen nicht von nicht thermodynamisch geprägten Messsignalen (Kraft- und Wegmessung) auf thermodynamische Vorgänge gerechnet werden muss. Beide Schritte bergen das Risiko, dass Fehler bei der Korrelation bzw. der Übertragung entstehen, die Ansätze nur in definierten und nicht mehr praxisrelevanten Grenzen funktionieren. Hinzu kommt noch, dass die Zusammenhänge immer komplexer werden und nicht mehr praxistauglich eingesetzt werden können. Das in Echtzeit übermittelte Wärmestromsignal des Wärmestromsensors liefert erstmals eine direkte Information aus der Fügezone, welcher Wärmestrom in welcher Zeit vom Heizelement an den Kunststoff abgegeben wurde, sprich detektiert die Plastifizierleistung des Heizelements. Die Wärmestrombilanzierung bietet somit die Chance, erstmals ohne räumliche Übertragungsproblematiken und Umrechnungen von Messsignalen, die thermischen Vorgänge im Schweißprozess detektierbar und so deutlich einfacher, schneller, effektiver und aussagekräftiger anzuwenden.

Ein weiterer Punkt, der die Wirtschaftlichkeit des Prozesses betrifft, ist, dass im Falle einer umfassenden Wärmestrombilanzierung zusätzlich verbaute Kraft- und Wegsensoren entfallen könnten und somit die Anschaffung der Wärmestromsensoren weder den Kaufpreis einer Schweißmaschine negativ beeinflusst, noch die Betriebskosten und somit auch nicht die Stückkosten. Die Substitution von Kraft- und Wegsensoren durch Wärmestromsensoren und die Realisierung einer umfassenden Wärmestrombilanzierung würde folglich dem Heizelementstumpfschweißen zu einer deutlich gesteigerten Prozesssicherheit verhelfen. Eine Korrelation der Wärmestrombilanzierung mit der

#### **4. Herausforderungen und Chancen einer Inline-Wärmestrombilanzierung**

---

Nahtqualität und eine bauteilindividuelle Optimierung beispielsweise der An-  
gleichzeit im Falle geringer Bauteiltoleranzen, kann zudem die Schweißzeiten  
verkürzen und weiter die Wirtschaftlichkeit steigern. Ein zusätzlicher Faktor  
ist, dass eine Inline-Qualitätskontrolle voll- oder teilautomatisiert erfolgen  
kann und somit der Faktor Mensch in der Produktion mit allen Vorteilen ver-  
ringert werden kann. Der Faktor Mensch stellt immer einen Kostenfaktor dar  
und bringt eine erhöhte Fehleranfälligkeit in den Prozess. Die Inline-  
Wärmestrombilanzierung würde sich auch hier positiv auf die Bilanz des Pro-  
zesses auswirken.

## **5. Zielsetzung**

Das Heizelementstumpfschweißen ist ein bereits in vielen Bereichen der Industrie zum Einsatz kommendes Schweißverfahren, welches auf eine lange Entwicklungsgeschichte zurückblicken kann. Es ist ausreichend Literatur zu finden, die das Verfahren an sich, die aktuelle Maschinenteknologie und auch die Einflüsse auf die Schweißnahtqualität beschreibt. Auch existieren diverse Arbeiten, die einen Zusammenhang zwischen Schweißparametern und Schweißnahtqualität versuchen herzustellen. Allerdings stoßen alle bisherigen Untersuchungen immer an ihre Grenzen, wenn es darum geht, eine praxisgerechte und zuverlässige Möglichkeit der Qualitätssicherung für das Heizelementstumpfschweißen zu realisieren, obwohl dies für die Wirtschaftlichkeit und Effizienz des Verfahrens entscheidend ist.

Alle aktuellen Ansätze zur Parameterfindung, -optimierung und Qualitätssicherung basieren zwar auf der Beschreibung der thermodynamischen Verhältnisse zwischen Heizelement und Kunststoff während und nach der Plastifizierung, allerdings existiert für das Heizelementstumpfschweißen keine Sensortechnologie, die die aktuellen thermodynamischen Verhältnisse im Schweißprozess direkt messtechnisch erfassen kann. Daher wurden bislang diverse theoretische Ansätze entwickelt, die zum Teil stark empirisch geprägt sind und einerseits die thermodynamischen Verhältnisse anhand von Kraft- und Wegsensoren zu beschreiben und gleichzeitig die räumliche Distanz zwischen dem Einbauraum der Sensoren und der Fügeebene zu kompensieren versuchen. Dennoch kann zunehmend beobachtet werden (siehe beispielsweise Abbildung 21), dass trotz unzähliger Anpassungen der Ansätze, diese immer wieder an Ihre Grenzen stoßen und an Aussagekraft verlieren, wenn sie mit aktuellen Schweißmaschinenkonfigurationen auf moderne Materialien angewendet werden (vgl. 2.2.4).

Das Ziel der Dissertation besteht deshalb darin, erstmals über hochtemperaturbeständige Wärmestromsensoren in der Fügezone direkt einen Messwert aus dem prozessrelevanten Bereich zu generieren, der zudem gleichzeitig die thermodynamischen Vorgänge zwischen Heizelement und Fügepartner direkt beschreiben kann. Nur so ist der Industrie eine Möglichkeit an die Hand gegeben, mit der sie qualitativ hochwertige Produkte überwachen und Ausschuss minimieren kann. Je nach Anwendungsfall soll sogar eine Substitution von

## 5. Zielsetzung

---

Kraft- und Wegsensoren mittels hochtemperaturbeständiger Wärmestromsensoren möglich sein, sodass kaum oder keine Mehrkosten entstehen bei gleichzeitiger Möglichkeit einer hochwertigen Inline-Qualitätssicherung.

Hierzu ist es notwendig, sowohl die hochtemperaturbeständigen Wärmestromsensoren sowie das Heizelement so zu modifizieren, dass diese kombiniert werden können und während des eigentlichen Angleich- und Anwärm-schritts eine direkte Messwertaufzeichnung und Auswertung vorgenommen werden kann. Weiterhin soll dieser Messwert untersucht, dessen Aussagekraft erforscht und Korrelationen zu relevanten Prozessphasen gezogen werden. Die richtige Interpretation der so gewonnen Wärmestromaufzeichnung wird als Schlüssel dafür gesehen, sowohl prozess- als auch materialspezifische bzw. bauteilspezifische Aussagen zu generieren, mit denen eine Inline-Qualitätssicherung zuverlässig und praxisrelevant durchgeführt werden kann. Prozessspezifische Aussagen betreffen in diesem Zusammenhang, dass idealerweise Angleichzeiten, Anwärmzeiten und auch deren Abfolgen dargestellt, überwacht und optimiert werden können. Material- bzw. bauteilspezifische Aussagen beziehen sich darauf, dass die Wärmestrombilanzierung es im Idealfall sogar zulässt, eine Aussage über beispielsweise Bauteiltoleranzen zu liefern oder sich auch eine Prognose zur erwartenden Bauteilfestigkeit erstellen lässt.



## 6. Versuchsdocumentation

### 6.1. Materialauswahl

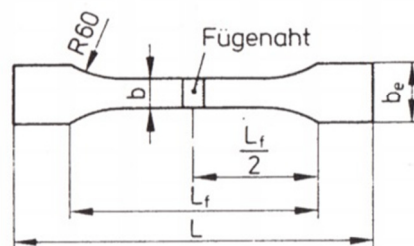
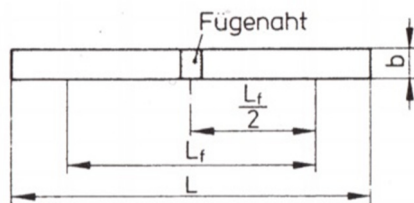
Die Korrelation der Wärmestrombilanzierung mit der Nahtqualität erfolgte unter Nutzung der nachfolgenden Materialien. Es wurden praxisbezogen und repräsentativ amorphe und teilkristalline Thermoplaste ausgewählt, welchen eine hohe Akzeptanz in der Industrie zukommt und gerade für technische Produkte, sowohl in der Einzel- als auch Serienfertigung, oft zum Einsatz kommen. Für die Untersuchungen wurde Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS), Polycarbonat (PC), Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polystyrol (PS) und Polyvinylchlorid (PVC) ausgewählt. Das Copolymer ABS zeichnet sich durch eine gute mechanische Festigkeit, eine hohe Schlagzähigkeit, gute Weiterverarbeitbarkeit, gute dielektrische Eigenschaften sowie eine geringe Feuchtigkeitsaufnahme aus. Einsatz findet das amorphe Material bei schlagbeanspruchten technischen Bauteilen wie Gehäuse oder Verschaltungsteilen [Rei13-1]. PC zeichnet sich durch eine hohe Schlagzähigkeit und eine hohe Härte bei gleichzeitiger guter Hitze- und Witterungsbeständigkeit aus. Da das amorphe Material zudem absolut transparent ist, kommt es sehr häufig im Sicherheitsbereich, im Maschinenbau, Messebau, bei Bushaltestellen und Abdeckungen aller Art zum Einsatz. Polyethylen ist ein teilkristalliner Kunststoff mit hoher chemischer Widerstandsfähigkeit, hoher Zähigkeit und Steifigkeit. Er zeichnet sich weiterhin durch eine hohe Wirtschaftlichkeit und hervorragende Verarbeitbarkeit aus und ist physiologisch unbedenklich. Die Platten werden für den chemischen Behälter- und Apparatebau, die Energie- und Elektrotechnik, den Maschinenbau, die Bio- und Pharmaindustrie sowie für die Transport-, Förder- und Lagertechnik eingesetzt [Sim13-1]. Ein weiterer Vertreter der teilkristallinen Polymere ist PP. PP ist dauerwärmestabil, weist eine hohe chemische Widerstandsfähigkeit, gute Langzeiteigenschaften gegenüber vielen Medien auf und besitzt eine hohe Steifigkeit im oberen Temperaturbereich. PP ist wie PE physiologisch unbedenklich. Einsatz findet das Material im chemischen Behälter- und Apparatebau, der Energie- und Elektrotechnik, der Druck-, Papier-, und Textilindustrie sowie im Maschinenbau und der Mobilität [Sim13-2]. Polystyrol als Vertreter der amorphen Thermoplaste ist ein harter und formstabiler Werkstoff mit einer geringen Wasseraufnahme. Im technischen Umfeld wird PS dank seiner guten dielektrischen Eigenschaften vorwiegend in der Energie- und Elektrotechnik-Branche eingesetzt [Rei13-2]. PVC (amorpher Kunststoff) ist ein chemisch sehr widerstandsfähiges, sehr

gut UV- und witterungsstabiles Material mit einer hohen Steifigkeit. Das Material ist eingesetzt im chemischen Behälter- und Apparatebau, für Auskleidungen und Verbundbau sowie für die Klima- und Lüftungstechnik [Sim13-3].

### 6.2. Bestimmung der Schweißnahtqualität

Die Bewertung der Schweißnahtqualität kann anwendungsbezogen bzw. praxisrelevant erfolgen. Allein die DVS (Richtlinien des Deutschen Verbands für Schweißen und Verwandte Verfahren e.V.) beschreibt diverse Möglichkeiten wie Biegeversuche, Zugversuche, Schlagzugversuche usw. Die wohl am häufigsten zum Einsatz kommende Prüfung von Schweißverbindungen ist der klassische Kurzzeit-Zugversuch in einer Universalzugprüfmaschine gemäß der Richtlinie DVS 2203 Teil 2 (Prüfen von Schweißverbindungen aus thermoplastischen Kunststoffen - Zugversuch).

Hierbei wird aus dem zu prüfenden Nahtbereich ein Zugprobekörper definierter Geometrie entnommen. Die Abbildung 29 zeigt die von der DVS vorgegebenen zwei Gestaltungsvarianten eines Zugprobekörpers zur Bestimmung der Kurzzeit-Zugfestigkeit. Zu erkennen ist, dass der Wulstbereich jeweils zentrisch angeordnet ist.



**Abbildung 29:**  
Darstellung möglicher Probekörpergeometrien zur Bestimmung der Kurzzeit-Zugfestigkeit nach DVS 2203 Teil 2 [DVS12-6]

Dicke h	Probe Form 1			Probe Form 2			
	b	L <sub>f</sub>	L	b	L <sub>f</sub>	L	b <sub>e</sub>
≤ 10	15	120	≤ 170	10	115	≤ 170	20
> 10	30	120	≤ 300	30	115	≤ 300	40
> 20	1,5 · h	200	≤ 400	1,5 · h	200	≤ 400	80

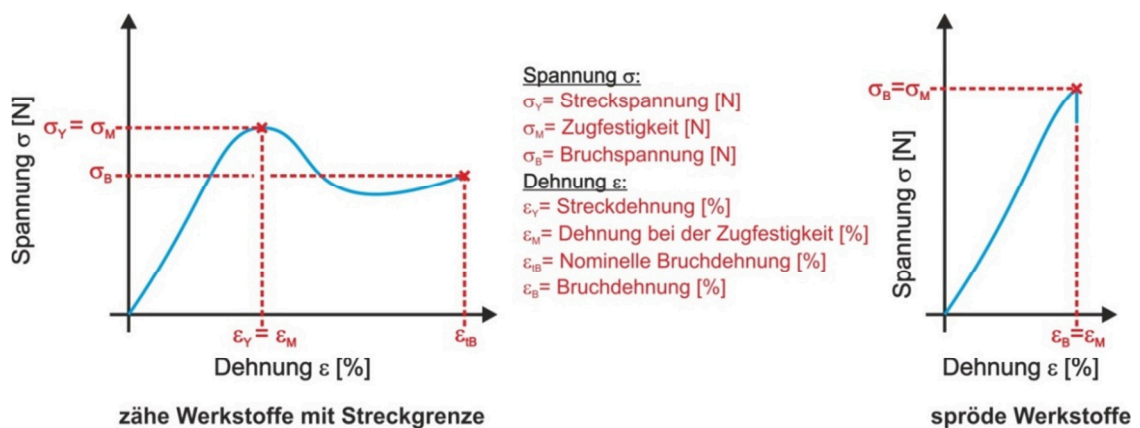
Zur Bestimmung der Festigkeit des Probekörpers wird bei einer gleichbleibenden Prüfgeschwindigkeit der Probekörper gedehnt. Als Prüfgeschwindigkeit wird in diesem Falle die Geschwindigkeit der Einspannklemmen bezeichnet, die sich während des Versuches voneinander entfernen. Das Ergebnis des

Zugversuch ist typischerweise ein x-y-Plot mit der Dehnung auf der Abszisse und der Zugspannung oder der Zugspannung auf der Ordinate. Tabelle 3 beinhaltet die Prüfbedingungen der durchgeführten Zugversuche.

**Tabelle 3: Prüfbedingungen Zugversuch gemäß DVS 2203-2**

<b>Eigenschaften Zugversuch</b>		
Einspannlänge		115 mm
Vorkraft		10 N
Geschwindigkeit Vorkraft		5 mm/min
Prüfgeschwindigkeit (lagegeregt)	ABS	50 mm/min
	PC	50 mm/min
	PE	50 mm/min
	PP	20 mm/min
	PS	10 mm/min
	PVC	10 mm/min
Bereich Kraftmessdose		10 kN

Die Auswertung des Zugversuches erfolgt über die Bestimmung von Spannungen und Dehnungen gemäß der DIN EN ISO 527-1. Abbildung 30 zeigt zwei Fälle einer Auswertung des Zugversuches gemäß der DIN EN ISO 527-1 für spröde Werkstoffe und zähe Werkstoffe mit Streckgrenze.



**Abbildung 30: Typische Spannungs-Dehnungskurven für zähe Werkstoffe mit Streckgrenze und spröde Werkstoffe gemäß der DIN EN ISO 527-1 [DIN96]**

Die Spannung  $\sigma$  während eines Zugversuches beschreibt die auf den Anfangsquerschnitt (innerhalb der Messlänge) bezogene Zugkraft zu jedem Zeitpunkt des Zugversuchs. Die Streckspannung  $\sigma_Y$  entspricht hierbei dem ersten

Spannungswert, bei dem der Zuwachs der Dehnung  $\varepsilon$  ohne weiteren Anstieg der Spannung  $\sigma$  auftritt. Im Falle eines zähen Werkstoffes mit Streckgrenze, wie in Abbildung 30 dargestellt, ist dieser Punkt identisch mit der Zugfestigkeit  $\sigma_M$ . Im Allgemeinen beschreibt die Zugfestigkeit  $\sigma_M$  die Maximalspannung, der der Probekörper im Zugversuch standhält. Die Bruchspannung  $\sigma_B$  ist per Definition die Spannung, die beim Bruch des Probekörpers auftritt und bei einem spröden Werkstoff identisch ist mit der Zugfestigkeit  $\sigma_M$  [DIN96].

Die Dehnung  $\varepsilon$  eines Probekörpers entspricht im Allgemeinen der auf die ursprüngliche Länge bezogenen Änderung der Messlänge. Die Streckdehnung  $\varepsilon_y$  ist die Dehnung bei Streckspannung  $\sigma_y$ . Die Dehnung  $\varepsilon_M$  bei der Zugfestigkeit beschreibt die Dehnung bei Maximalspannung, wenn diese mit oder ohne Streckpunkt auftritt. Die nominelle Bruchdehnung  $\varepsilon_{tB}$  ist die Dehnung bei der entsprechenden Bruchspannung, für den Fall, dass der Bruch jenseits eines Streckpunktes erfolgt. Die Bruchdehnung  $\varepsilon_B$  beschreibt die Dehnung bei der zugehörigen Bruchspannung  $\sigma_B$  [DIN96].

Eine für den Bereich Fügen von Kunststoffen spezielle Art der Auswertung baut auf den beschriebenen Standardkennwerten auf und setzt diese ins Verhältnis zu den jeweiligen Grundmaterialkennwerten. Der Quotient aus Zugfestigkeit einer geschweißten Probe zur Zugfestigkeit einer ungeschweißten Probe gleichen Materials wird Schweißfaktor genannt. Die Quotientenbildung liefert eine für das entsprechende Material allgemeingültige Aussage, mit der sowohl Materialien als auch die Nahtqualität verschiedener Schweißverfahren untereinander verglichen werden können. Um die Nomenklatur noch weiter zu verbessern, ist es üblich, den Schweißfaktor noch mit dem entsprechenden zugrunde gelegten Prüfverfahren zu vervollständigen. Im hier gezeigten Falle eines Kurzzeitzugversuches wäre das Resultat ein Kurzzeit-Zug-Schweißfaktor. D.h. ein Kurzzeit-Zug-Schweißfaktor von 0,90 sagt aus, dass die geschweißte Verbindung 90% der maximalen Festigkeit einer ungeschweißten Probe erreicht.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden vorwiegend Kurzzeitzugfestigkeiten bestimmt. Es wurden hierzu in Anlehnung an die DVS 2203 Teil 2 Probekörper

der Form 2 verwendet. Um eine statistische Absicherung zu erreichen wurden immer zwei Schweißungen mit identischen Parametern durchgeführt und jeweils zwei Probekörper pro Schweißung entnommen und geprüft. D.h. alle nachfolgenden Darstellung beziehen sich auf den Mittelwert aus vier Probekörpern. Es ist ebenso die jeweilige Standardabweichung im Diagramm dargestellt.

### **6.3. Ausstattung der verwendeten Heizelementstumpfschweißmaschine**

Für die Versuchsdurchführung wurde die in der Abbildung 31 dargestellte Heizelementstumpfschweißapparatur der Fa. WIDOS Wilhelm Dommer Söhne GmbH (WIDOS 2500 SPS 3.0) herangezogen. Die Maschine besitzt zwei servoelektrisch bewegte Fügeschlitten mit pneumatisch betätigten Spannvorrichtungen. Der servoelektrische Antrieb der Fügeschlitten ist so



**Abbildung 31: Heizelementstumpfschweißapparatur Fa. WIDOS Wilhelm Dommer Söhne GmbH**

ausgelegt, dass Fügekräfte bis 300 N aufgebracht werden können. Die Schlitten können unabhängig voneinander bewegt werden und es verfügt jeder Schlitten über eine eigene Kraft- und Wegaufzeichnung. Das Heizsystem besteht aus zwei getrennten Heizelementen, die durch eine keramische Isolationsschicht voneinander getrennt sind und jeweils individuell mit Aufsatzplatten bestückt werden können. Der Vorteil zweier getrennter Heizkreisläufe ermöglicht im Falle von gleichen, aber auch unterschiedlich gestalteten bzw. bestückten Aufsatzplatten, eine sehr exakte Temperaturführung auf beiden Seiten des Heizelements. Der Aufbau

mit PTFE-beschichteten Aufsatzplatten entspricht einem konventionellen Versuchsaufbau. Zur Detektion des Wärmestromsignals während des Schweißprozesses wurde mindestens eine Aufsatzplatte modifiziert und mit einem Sensor bestückt. Eine detaillierte Darstellung des Versuchsaufbaus mit Wärmestromsensoren ist im nachfolgenden Abschnitt 6.5 enthalten.

## 6. Versuchsdokumentation

---

Die Schweißmaschine selbst besitzt eine CNC-Steuerung für komplexe Programmabfolgen sowie eine fortlaufende Protokollierung der Schweißparameter einschließlich Kraft- und Wegaufzeichnungen. Ebenso bietet die Maschine die Möglichkeit die Kraft- und Wegverläufe während der Schweißung parallel über einen Universalmessverstärker extern aufzuzeichnen. Der Vorteil der zusätzlichen externen Aufzeichnung ist, dass über den Universalmessverstärker weitere Sensoren wie Temperaturfühler, Wärmestromsensoren usw. angeschlossen und automatisch synchronisiert mit den Schweißabfolgen Prozessanalysen durchgeführt werden können. Im aktuellen Fall wurde für die Untersuchungen ein Universalmessverstärker (QuantumX MX840A) der Fa. HBM Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH verwendet, der hochauflösend (bis 19,2 kHz pro Kanal) acht Sensoren gleichzeitig abfragen kann. Bei den Kraftmessdosen handelt es sich um Kraftmessdosen K-25 der Fa. Lorenz Messtechnik GmbH mit einem maximalen Kraftbereich von  $\pm 500\text{N}$ . Zur Wegmessung wurden potentiometrische Wegaufnehmer (FWA 300 T) der Fa. Ahlborn Mess- und Regeltechnik GmbH mit einem effektiven maximalen Weg von 300mm herangezogen.

Zur Kalibration der Sensoren der Schweißmaschine wurden extern kalibrierte Kraft- und Wegsensoren eingesetzt und diese als Referenz in den Prozess eingebracht. Die Heizelementtemperatur wurde fortlaufend mit einem kalibrierten Oberflächenfühler in regelmäßigen Abständen überwacht, besonders im Falle einer Änderung der Schweißtemperatur.

Obwohl es sich bei dieser Schweißmaschine bezüglich der Hardware um eine seriennahe Schweißapparatur handelt, wurde diese mit einem speziellen Programm für den Laborbetrieb ausgestattet. D.h. die Schweißabfolgen wurden auf Sicherheit und Reproduzierbarkeit und nicht auf Geschwindigkeit ausgelegt. Aus diesem Grund verging zwischen den Schweißzyklen mindestens 1 Minute bis die nächste Schweißung erfolgte. Grund hierfür war, dass die Materialien händisch eingelegt wurden, die sicherheitsrelevanten Schritte (Spannvorrichtung verriegelt, Tür geschlossen, etc.) bestätigt werden mussten und die Maschine die Schleppkraftkompensation bei jeder Schweißung durchführte. Diese Maßnahmen sind der Garant für zufriedenstellende, reproduzierbare und übertragbare Schweißbedingungen.

#### **6.4. Bestimmung Schmelzschichtdicke (SSD) und Restschmelzschichtdicke (RSSD)**

Wenn dem entsprechenden Kapitel nichts anderes entnommen werden kann, wurde sowohl die SSD als auch die RSSD über die Materialverdrängung in der Maschine mit Hilfe der integrierten Wegsensoren ermittelt. Hierzu wurden die Proben mit zwei Megapascal belastet und entsprechend der im Abschnitt 2.2.3 zitierten Literatur der erhaltene Messwert als 95%-Wert angenommen. Abbildungen und Werte für SSD und RSSD beziehen sich immer auf 100% SSD oder RSSD. Da die Branche dieses Vorgehen so oder ähnlich in der Literatur häufig verwendet und sich die Kernaussage unabhängig der Darstellung nicht ändert, wird dieses Vorgehen auch in dieser Arbeit soweit möglich umgesetzt.

#### **6.5. Eigenschaften der verwendeten Wärmestromsensoren**

##### **6.5.1. Aufbau und Funktion**

###### **Wärmestromsensor der Fa. ITI-Company**

Der Wärmestromsensor der Fa. ITI-Company (ITI – International Thermal Instrument Company, Inc., Del Mar, Kalifornien, USA) besitzt die Abmaße 100mm x 15mm x 6mm (BxHxT) und besteht aus einer Thermosäule sowie einem zentral eingebrachten Thermoelement Typ K, eingeschweißt zwischen zwei dünnen Metallplatten. Die Metallplatten besitzen laut Hersteller die Aufgabe, sowohl die Thermosäule als auch das Thermoelement vor dem plastifizierenden Kunststoff zu schützen und die während der Angleichphase auftretenden Kräfte abzufangen und aufzunehmen. Die Temperaturstabilität des Sensors reicht gemäß Datenblatt bis etwa 980°C. Der Sensor verfügt über ein Kalibrierprotokoll der Fa. ITI-Company. Abbildung 32 zeigt den beschriebenen Sensor.

Die Ansprechzeit des Sensors liegt im Bereich von wenigen ms und ist mehr als ausreichend für einen Heizelementstumpfschweißprozess.

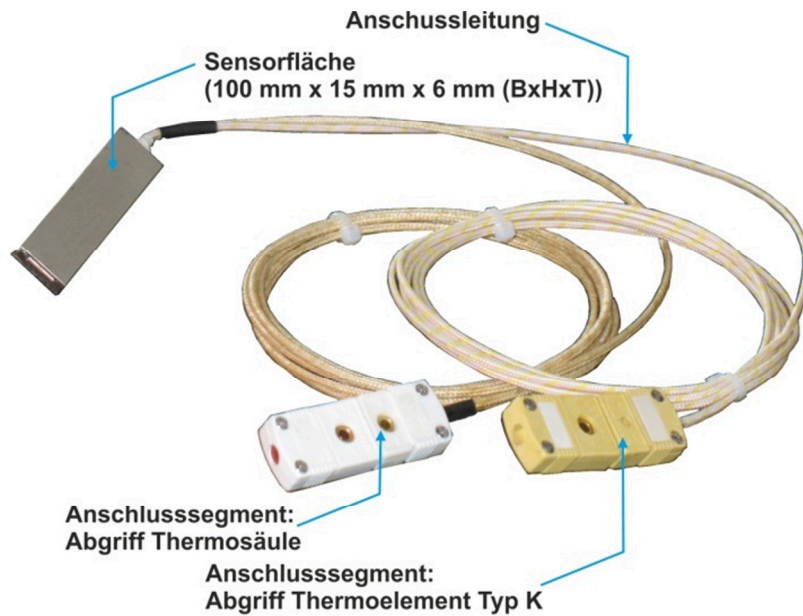


Abbildung 32: Darstellung Wärmestromsensor Fa. ITI Company

### Wärmestromsensor der Fa. MesoScribe Technologies Inc.

Der Wärmestromsensor der Fa. MesoScribe Technologies Inc. (Huntington Beach, Kalifornien, USA) ist in Abbildung 33 und Abbildung 34 zu sehen. Die Abbildungen veranschaulichen den von der Fa. MesoScribe Technologies Inc. eigens für diese Untersuchungen entsprechend einem vorgegebenen Lastenheft hergestellten Prototyp eines Wärmestromsensors. Bisher wurden, laut Hersteller, Sensoren lediglich bis zu einer Größe von 15mm x 15mm gefertigt. Der Zeichnung aus Abbildung 34 kann entnommen werden, dass die Sensorfläche dieses Sensors 100mm x 15mm beträgt und der Sensor eine Dicke von maximal 0,4mm einschließlich Dielektrikum und Sensorleitungen hat. Die aktuelle Freigabe der Fa. MesoScribe Technologies Inc. hinsichtlich thermischer Stabilität liegt bei etwa 450°C im Dauerbetrieb. Die Ansprechzeit gibt der Hersteller je nach Temperaturgradient mit unter 0,1s an und die maximale Belastbarkeit liegt bei über 5MPa.



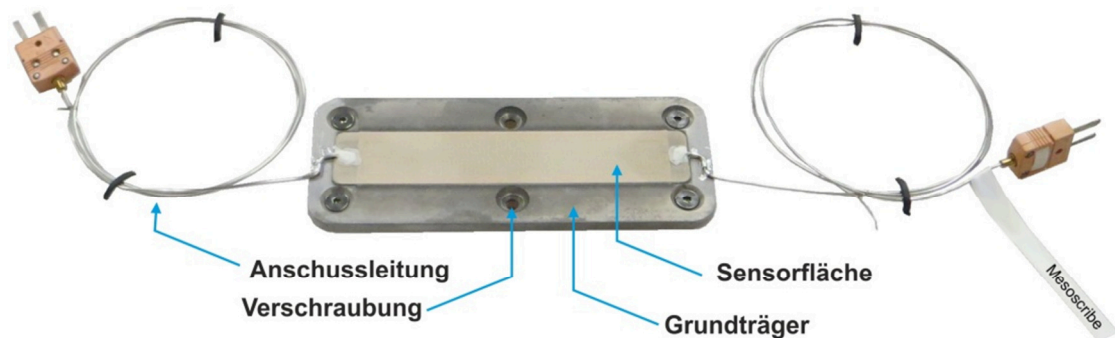
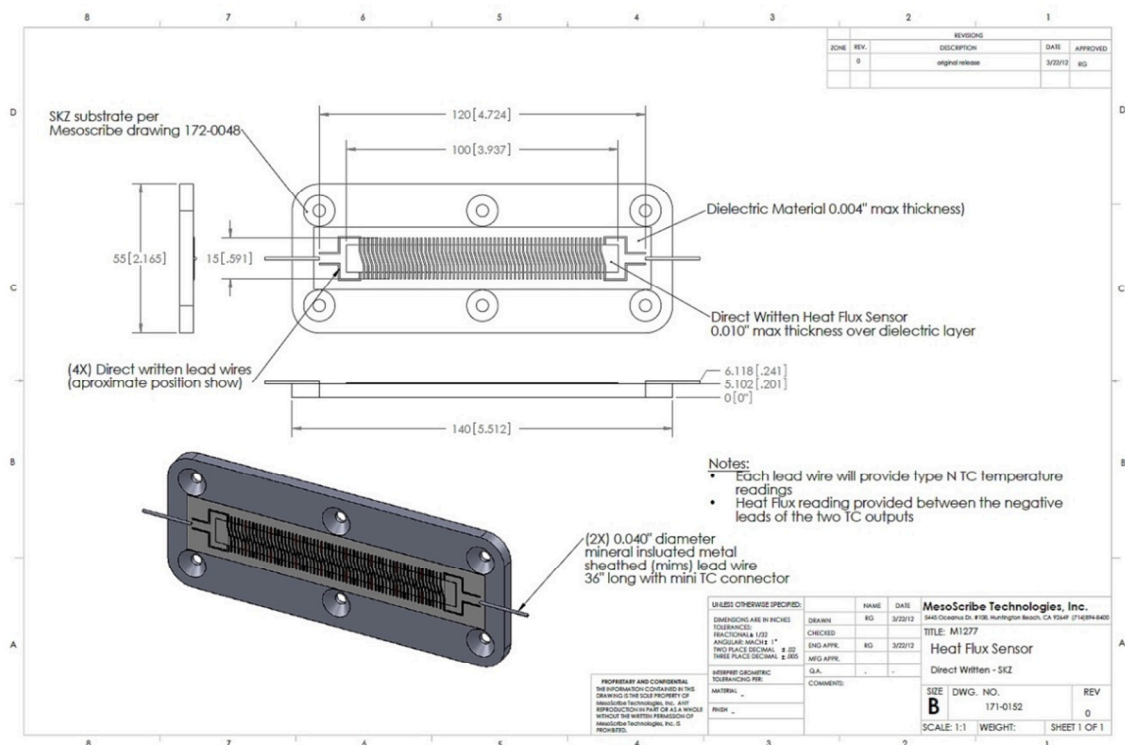
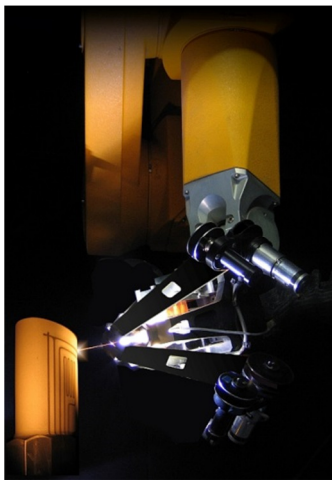


Abbildung 33: Darstellung Wärmestromsensor Fa. MesoScribe Technologies Inc.

Abbildung 34: Zeichnung Wärmestromsensor Fa. MesoScribe Technologies Inc.  
(siehe auch vergrößerte Darstellung im Anhang Abschnitt 15.1)

Für die Herstellung nutzt die Fa. MesoScribe Technologies Inc. ein eigens entwickeltes Herstellungsverfahren namens Direct Write Thermal Spray (DWTS). Besonderheit des DWTS ist, dass hiermit elektrische Leiter, dielektrische Schichten sowie Polymerblends direkt auf eine Oberfläche aufgebracht werden können. Abbildung 35 zeigt einen Auszug aus einer Publikation der Fa. MesoScribe Technologies Inc. zum Thema DWTS.

Das Verfahren nutzt ein pulverförmiges Ausgangsmaterial, welches über eine Gasflamme aufgeschmolzen und anschließend in Richtung eines zu beschichtenden Substrates beschleunigt wird. Auf dem zu beschichtenden Substrat schlägt das plastifizierte Pulver auf, kühlt ab und bildet einen festen Verbund mit dem Trägermaterial. Ein 3D-Handling-System, wie in Abbildung 35 dargestellt, ermöglicht es, beliebige Konturen abzufahren und somit feinste Sensoren direkt auf ein Trägermaterial aufzubringen.



**Abbildung 35: Darstellung des Direct Write Thermal Spray – Verfahrens der Fa. MesoScribe Technologies Inc. zur Herstellung von ultradünnen und hochbelastbaren Wärmestromsensoren [Mes13]**

Im Falle der Wärmestromsensoren wurde eine Thermosäule aus Nickel-14,2% Chrom-1,4% Silizium und Nickel-4,4% Silizium-0,1% Magnesium hergestellt, sprich eine Thermo-säule aus Thermoelementpaarungen des Typs N [Sam13].

Der Sensor der Fa. Mesoscribe Technologies Inc. wurde ohne Kalibration ausgeliefert.

Die Ansprechzeit des Sensors liegt im Bereich von wenigen ms und ist geeignet für einen Heizelementstumpfschweißprozess.

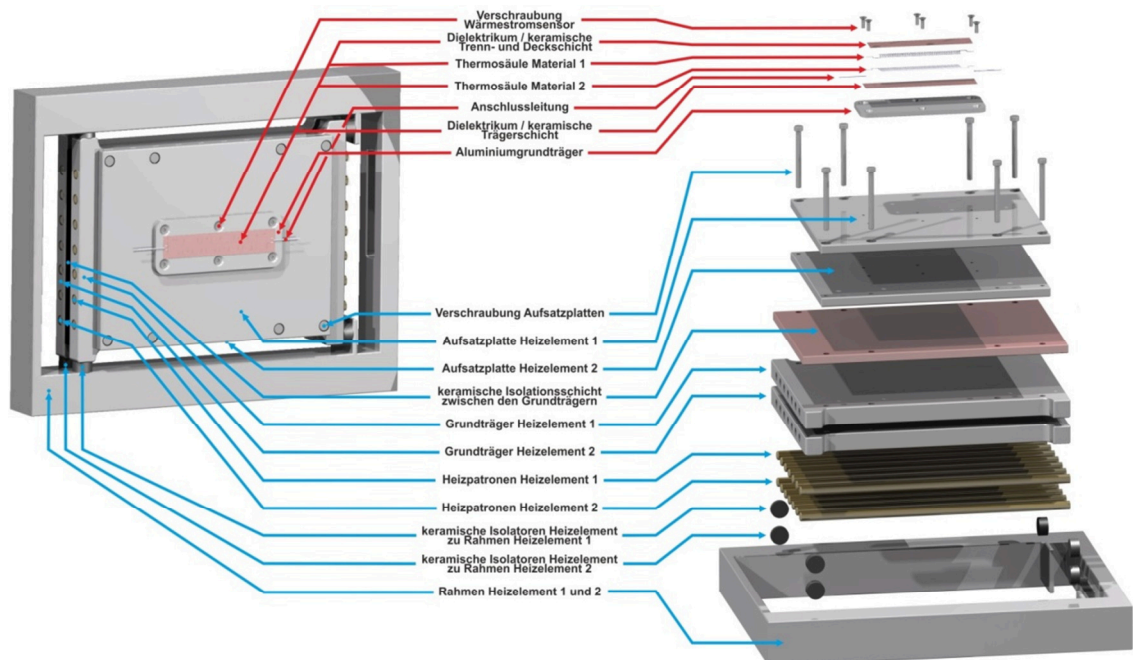
### 6.5.2. Kalibration der Sensoren

Wie im Kapitel 3.5 bereits angedeutet, ist die Kalibration der Sensoren ein entscheidender Faktor für die Rückführbarkeit der erhaltenen Messwerte auf reale Kennwerte. Da vor allem ein Schweißprozess einen hochdynamischen Prozess darstellt, wenn der kalte Kunststoff auf den heißen Sensor auftrifft und dort plastifiziert, werden die nachfolgenden Untersuchungen als „Worst Case Scenario“ durchgeführt. „Worst-Case Scenario“ soll bedeuten, dass alle Untersuchungen auf den Spannungswerten des Wärmestromsensors basieren und davon ausgegangen wird, dass im schlimmsten Fall der Sensor im industriellen Umfeld nicht zuverlässig kalibriert werden kann. Ergebnisse, die mit den Rohdaten erzielt werden können, sollen als allgemeingültig angesehen werden und können dann gegebenenfalls mit einer Kalibration korrigiert werden. Ergebnisse mit einem möglicherweise unvoll-

ständig oder gar falsch kalibrierten Sensor bieten keinerlei Grundlage für fundierte Aussagen. Eine Diskussion sowie Untersuchungen zur Kalibrierbarkeit von Wärmestromsensoren in einem hoch dynamisch wechselnden Wärmestrombereich wie dem Heizelementstumpfschweißen, sollen im Anschluss an die grundlegenden Untersuchungen im Abschnitt 7.3.1 durchgeführt werden.

### 6.5.3. Sensorintegration in den Schweißprozess

Im Nachfolgenden ist am Beispiel des Sensors der Fa. MesoScribe Technologies Inc. dargestellt, wie die Wärmestromsensoren in den Schweißprozess eingebaut wurden (siehe Abbildung 36). Hierzu zeigt die Abbildung 36 im linken Teil den Gesamtaufbau des Heizsystems sowie im rechten Bereich eine Explosionszeichnung. Zu erkennen ist, dass der Wärmestromsensor unmittelbar über seinen Aluminiumgrundträger auf eine der Aufsatzplatten aufgeschraubt wurde und sich somit unmittelbar in der Fügezone befindet. Der Sensor selbst wird, wie bereits angesprochen, zusätzlich zu den Kraft- und Wegsensoren über einen Universalmessverstärker abgefragt.



**Abbildung 36:** Darstellung des Versuchsaufbaus für einen Sensor der Fa. MesoScribe Technologies Inc., Gesamtdarstellung des verwendeten Heizsystems (links); Detaildarstellung in Form einer Explosionszeichnung (rechts)  
(siehe auch vergrößerte Darstellung im Anhang)

Im gezeigten Fall werden parallel zum Wärmestromsignal auch die Kraft- und Wegsensoren der Schweißmaschine zeitgleich über den Universalmessverstärker abgefragt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

### 6.6. Messtechnik / Messbedingungen

Sowohl die Kraft- als auch die Wegsensoren der Schweißmaschine wurden ebenso wie die Wärmestromsensoren extern über einen Universalmessverstärker der Fa. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH abgefragt. Kalibrationen hinsichtlich der Kraft- und Wegsensoren waren fest in Anschlussstecker einprogrammiert und wurden in regelmäßigen Abständen mit externen Sensoren überwacht. Für die Wärmestromaufzeichnung wurde das Rohsignal ohne Kompensationen aufgezeichnet.

Alle Kraft- und Wegaufzeichnungen sowie die Aufzeichnung des Spannungssignals des Wärmestromsensors erfolgten mit einer Abtastrate von 300 Hz. Das Signal-Rauschverhältnis aller abgefragten Sensoren, insbesondere der Wärmestromsensoren, ist bei allen Untersuchungen ausreichend hoch gewesen, um das Nutzsignal sehr gut vom Hintergrundsignal unterscheiden zu können. Aus diesem Grund wurden auch für alle Versuche zur Detektion des Spannungssignals der Wärmestromsensoren, soweit möglich, Probekörper mit einer minimalen Fläche von 150mm<sup>2</sup> verwendet. Dies entspricht bei den verwendeten Sensoren einem Verhältnis Probekörper zu Sensorfläche von (Minimale Fläche Probekörper 150mm<sup>2</sup>; Sensorfläche 1500mm<sup>2</sup>) 1:10. Bis zu diesem Verhältnis wurde ein ausreichend hohes Signal-Rausch-Verhältnis detektiert. Kleinere Probekörper bzw. kleine Fügezonen wurden zunächst nicht berücksichtigt, weil diese nicht als praxisrelevant angesehen wurden, die Maschine für derart kleine Bauteile überdimensioniert gewesen wäre und keine zuverlässige Kraft- bzw. Wegregelung mehr hätte realisiert werden können.

Alle Schweißungen wurden bei vergleichbaren Raumtemperaturen ( $22 \pm 3^\circ\text{C}$ ) und vergleichbarer relativer Luftfeuchtigkeit ( $50 \pm 6\% \text{ r.F.}$ ) durchgeführt. Die Bestimmung der Zugfestigkeit wurde im Normklima gemäß der DIN EN ISO 139 durchgeführt.

### 6.7. Kriging-Korrelation zur Darstellung der Messdaten

Die Darstellung der Messdaten erfolgt mit Origin der OriginLab Corporation in Form einer 3D-Oberflächendarstellung. Origin benötigt für eine 3D-Oberflächendarstellung eine Matrix. Die so genannten XYZ-Gridding-Methoden konvertieren XYZ-Daten mit Hilfe eines ausgewählten Algorithmus in eine solche Matrix. Eine Origin Matrix beinhaltet ein Array von Z-Werten, die dann als X- und Y-Werte abgebildet werden. Da es sich bei den hier generierten Messdaten um nicht regelmäßige Daten, also nicht um Daten gleicher Abstände in X- und Y-Richtung handelt, wird eine Gridding-Methode mit XYZ-Zufallsdaten herangezogen, die sogenannte Kriging-Korrelation. Die Kriging-Korrelation ist benannt nach dem Bergbauingenieur D. G. Krige [Ori13]. Kriging gehört zu den geostatistischen Methoden, die einerseits auf statistischen Methoden basieren, aber auch mit der Autokorrelation arbeiten. Autokorrelation heißt, dass mit den statistischen Beziehungen zwischen den gemessenen Punkten gearbeitet wird. Es wird im Abschnitt 7.2 für diese Daten das Kriging ausgewählt, weil bei der Kriging-Methode davon ausgegangen wird, dass die Entfernung oder auch die Richtung zwischen den Referenzpunkten eine räumliche Korrelation widerspiegelt. Zudem können mit deren Hilfe zufriedenstellend Variationen auf der Oberfläche erklärt werden. Kriging wird häufig in der Geologie angewandt, wo bekannt ist, dass eine räumliche Korrelation der Messwerte angenommen werden kann [Arc13]. Da im aktuellen Fall auch davon ausgegangen werden soll, dass eine direkte Beziehung zwischen den Messwerten Heizelementtemperatur, Wärmestromdichteinformation  $\dot{q}_{3D}$  und Festigkeitsniveau besteht, wird die Kriging-Korrelation auch hier genutzt.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass auch eine andere Methode hätte genutzt werden können, die die Messpunkte beispielsweise direkt miteinander verbunden hätten. Die Kriging-Methode wurde primär ausgewählt, um eine für die Praxis leicht verständliche Darstellung zu erreichen. Zur praxisrelevanten Einschätzung, ob das Gridding die Messdaten ausreichend abbilden kann, sind in den entsprechenden Diagrammen immer die ursprünglichen Messwerte inklusive der Standardabweichungen eingetragen.

### 6.8. Versuchsaufbau zur Simulation von Wärmeleitungs- und Strahlungseinflüssen während der Anwärmzeit

Für die Simulation wurde in erster Linie die Anwärmzeit herangezogen, weil diese den relevanten Plastifizierschritt darstellt und hauptverantwortlich für die Nahtqualität ist. In der Angleichphase wird zwar auch Material plastifiziert, allerdings im Idealfall nur solange, bis der Probekörper flächig am Heizelement anliegt. Zudem sollte die in der Angleichphase plastifizierte Schmelze direkt in dieser Phase bereits zu 100% verdrängt werden, um ein möglichst schnelles und effizientes Angleichen gewährleisten zu können. Die eigentliche Plastifizierung sollte lediglich in der Anwärmphase stattfinden.

Um Erkenntnisse aus der Simulation gewinnen zu können, muss zunächst die Simulation soweit optimiert werden, dass der Wärmeeintrag und die über Wärmeleitung und Wärmestrahlung erzeugte Schmelzschichtdicke möglichst gut mit der Realität übereinstimmt, sprich, die mittels COMSOL ermittelte Schmelzschichtdicke mit der real plastifizierten Schmelzschichtdicke gleich ist.

Hierzu wurden gezielt Schweißungen durchgeführt und eine definierte Schmelzschichtdicke erzeugt. Die Detektion der Schmelzschichtdicke erfolgte im realen Versuchsaufbau in der Schweißmaschine über eine konventionelle Plastifizierung in einem schweißprozessähnlichen Ablauf, mit dem Unterschied, dass der Fügedruck maximal gewählt und so die plastifizierte Schmelze komplett aus der Naht verdrängt wurde. Quellen wie beispielsweise [Nat92] nutzen den maximalen Druck der Schweißmaschine, um so eine Bestimmung der Restschmelzschichtdicke mit zufriedenstellender Genauigkeit in einer Schweißmaschine durchzuführen. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei diesem Verfahren 95% der Restschmelzschichtdicke zuverlässig verdrängt wird, vorausgesetzt, es wird ein Fügedruck von mindestens 1,0 MPa eingesetzt. Die Probekörperfläche wurde auf 120mm<sup>2</sup> reduziert und so mit der aktuellen Schweißmaschine ein maximaler Fügedruck von 2,2 MPa erzeugt.

Im weiteren Verlauf wurde eine Modellierung mittels COMSOL vorgenommen und versucht, die real gemessene Schmelzschichtdicke mittels Software abzubilden. Es wurden alle relevanten Komponenten des Versuchsaufbaus im Maßstab 1:1 in Catia V5R20 konstruiert und an COMSOL übergeben. Weiterhin wurden alle notwendigen Materialkennwerte wie Temperaturleitfähig-

keit, Wärmeleitfähigkeit, Dichte und spezifische Wärmekapazität temperaturabhängig in einem Bereich von 20°C bis 300°C bestimmt, aufbereitet und ebenso an COMSOL übergeben. Die Generierung der Materialkennwerte wurde individuell mittels thermischer Analyse durchgeführt. Tabelle 4 führt kurz die Apparaturen der thermischen Analyse auf, mit denen die Materialkennwerte bestimmt wurden.

**Tabelle 4: Apparaturen zur Bestimmung der Materialkennwerte für die Simulation mittels COMSOL**

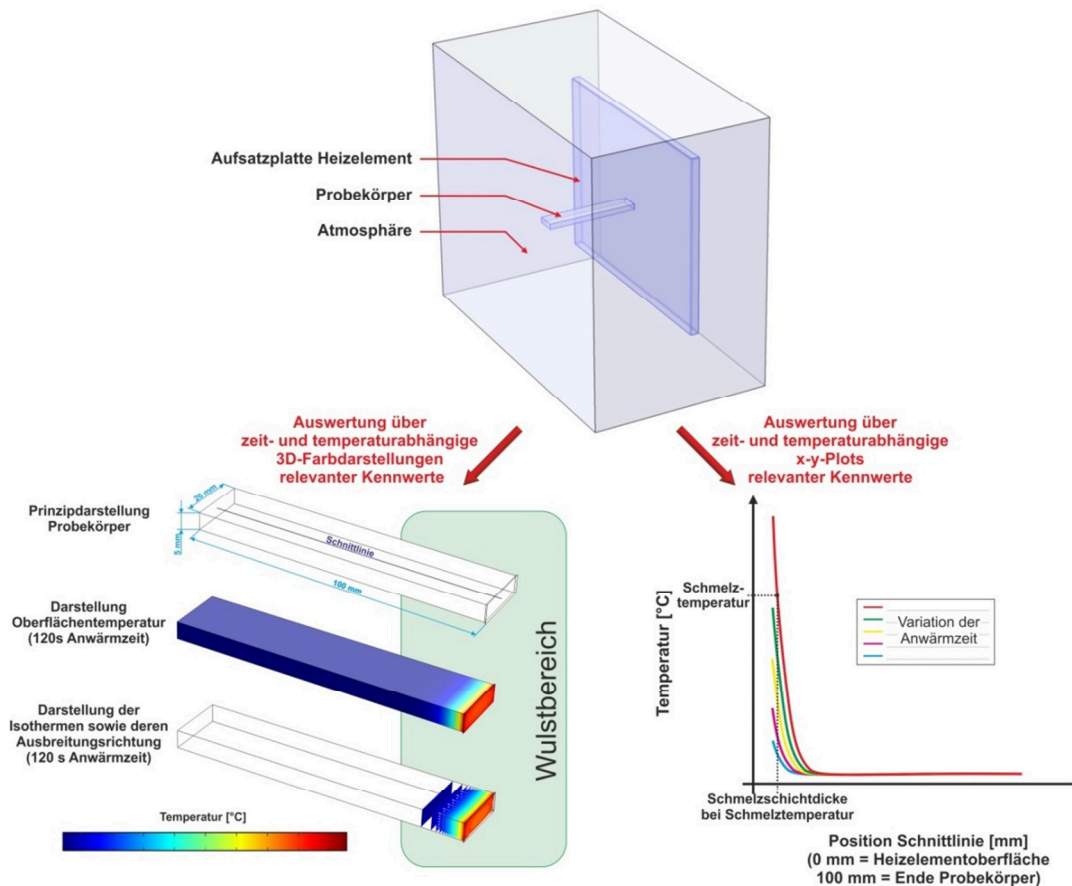
<b>Messverfahren</b>	<b>Kennwerte</b>
<b>Apparatur</b>	<b>Relevante Versuchsparameter</b>
<b>Hersteller</b>	
Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)	Spezifische Wärmekapazität
Fa. Netzsch Gerätebau GmbH	Temperaturbereich: 20°C – 300°C
Typ: DSC 204 F1 Phoenix	Referenzmaterial: Saphir
	Heiz-/ Kühlrate: 10 K/min
	Stickstoffatmosphäre
Thermomechanischer Analysator (TMA)	temperaturabhängiger Ausdehnungskoeffizient, temperaturabhängige
Fa. Netzsch Gerätebau GmbH	Dichtebestimmung
Typ: TMA 402 F1 Hyperion	Temperaturbereich: 20°C – 300°C
	Heiz-/ Kühlrate: 3 K/min
	Stickstoffatmosphäre
Xenon Flash Apparatur	Temperaturleitfähigkeit
Fa. Netzsch Gerätebau GmbH	(Wärmeleitfähigkeit über Verrechnung der Temperaturleitfähigkeit mit der spezifischen Wärmekapazität der DSC und der Dichte der TMA gemäß
Typ: LFA 447 NanoFlash	$\lambda(T) = a(T) \cdot c_p(T) \cdot \rho(T)$
	Temperaturbereich: 20°C – 300°C
	Normalatmosphäre

Die Messwerte wurden COMSOL in der maximalen Auflösung übergeben und für die Simulation stückweise kubisch interpoliert. Abbildung 37 zeigt den Simulationsaufbau sowie die zwei prinzipiellen Möglichkeiten, die im nachfolgenden zur Auswertung der Simulation verwendet wurden. Die Auswertung



## 6. Versuchsdocumentation

der Simulationsergebnisse erfolgte über zeit- und temperaturabhängige x-y-Plots sowie zeit- und temperaturabhängige dreidimensionale Farbdarstellungen. Weiterhin zeigt die Abbildung die exakten Maße des Probekörpers sowie die dreidimensional erstellte Schnittlinie, entlang derer die x-y-Plots erstellt wurden.



**Abbildung 37: Darstellung des Simulationsaufbaus sowie der daraus generierten Auswertungsmöglichkeiten**

Der in Abbildung 37 gezeigte Bereich mit der Bezeichnung Atmosphäre begrenzt den Versuchsraum, innerhalb dessen die Wärmestrahlung und somit auch die Wechselwirkungen zwischen dem Kunststoff und dem Heizelement berechnet wurden.



## 7. Ergebnisse und Diskussion

An dieser Stelle soll noch erwähnt werden, dass, wie bereits in Abschnitt 6.5.2 kurz erläutert wurde, im nachfolgenden zunächst nicht der eigentliche Wärmestrom- oder der Wärmestromdichteverlauf angetragen und bewertet ist, sondern der direkt abgegriffene Spannungswert des Wärmestromsensors, der erst über eine Kalibration zum eigentlichen Wärmestrom- bzw. Wärmestromdichtesignal wird. Der Grund hierfür liegt in der fehlenden Möglichkeit der Kalibration von Wärmestromsensoren, bei denen nur Teilflächen einem dynamischen Wärmestrom ausgesetzt sind. Der im nachfolgenden dargestellte Spannungswert des Wärmestromsensors entspricht dem gemessenen Rohwert. Die einfachste Art der Kalibration bedeutet, dass der Spannungswert direkt proportional zum Wärmestrom- bzw. Wärmestromdichtewert ist und der Kalibrationsfaktor lediglich ein Proportionalitätsfaktor darstellt (vgl. Gleichung 24 und Gleichung 25). Beispielsweise besitzt der Sensor der Fa. ITI Company, laut Hersteller, einen solchen linearen Kennwertverlauf, der Sensor der Fa. Mesocribe Technologies Inc. besitzt diesen nicht.

$$U \sim k_{\text{Wärmestrom}} \cdot \dot{Q}$$

**Gleichung 24**

und

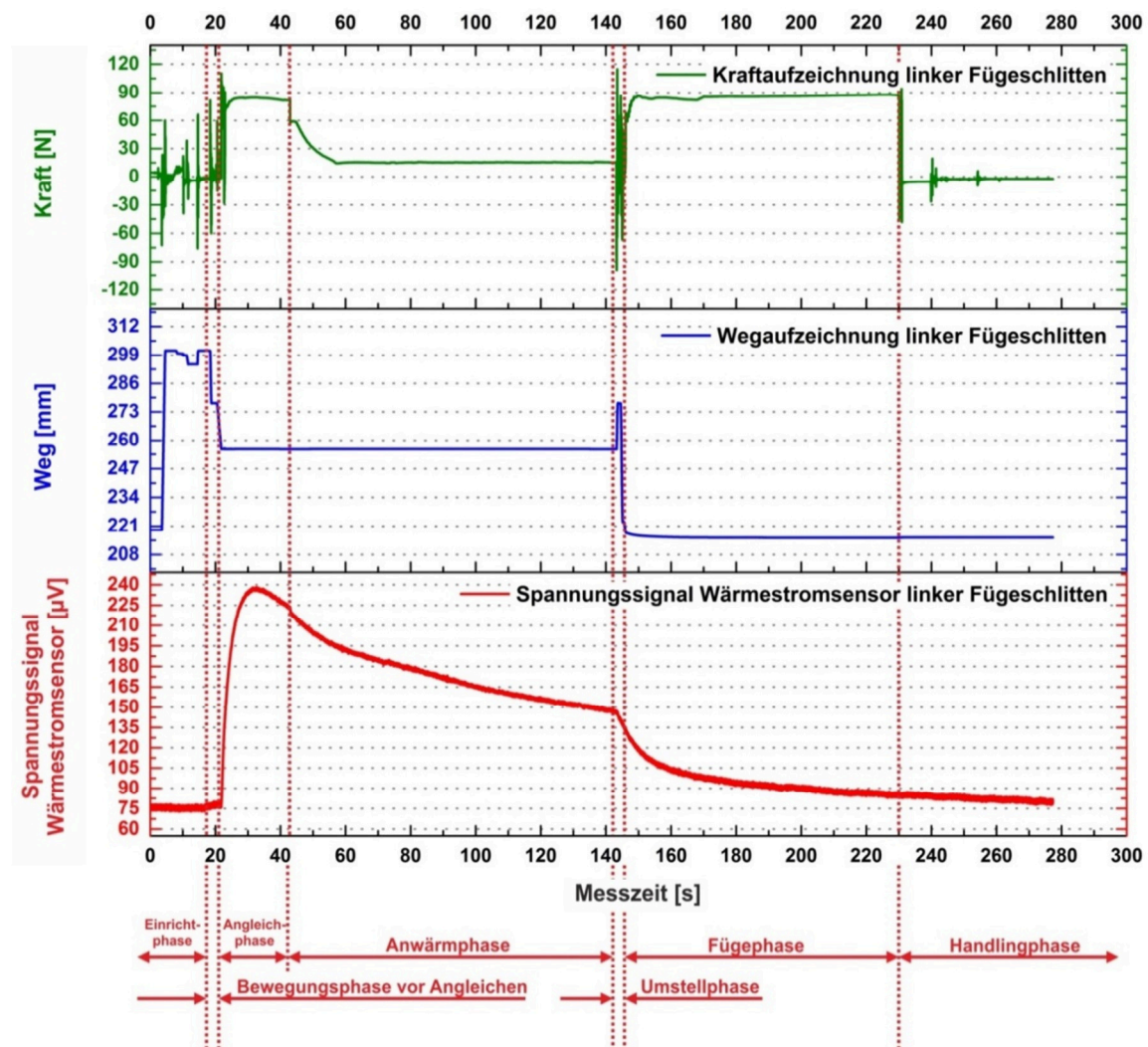
$$U \sim k_{\text{Wärmestromdichte}} \cdot \dot{q}$$

**Gleichung 25**

### 7.1. Wärmestrombilanzierung eines Schweißprozesses

Abbildung 38 zeigt konventionelle Ergebnisse einer Kraft- und Wegaufzeichnung erweitert mit einer Inline-Wärmestrombilanzierung während des kompletten Schweißverlaufes. Die Aufzeichnung der Weg- und Kraft- sowie Wärmestromverläufe sind am Beispiel des linken Fügeschlittens dargestellt. Neben den klassischen, zur Charakterisierung herangezogenen Prozessphasen Angleichen, Anwärmen, Umstellen und Fügen, können dank der Wärmestrombilanzierung zur detaillierteren Charakterisierung und zum besseren Verständnis des Prozesses weitere Phasen wie Einrichtphase, Bewegungsphase vor Angleichen und eine Handlingphase eingeführt werden.

## 7. Ergebnisse und Diskussion



Material	Probekörper- abmaße	Heizele- ment- temperatur	Angleich-zeit	Angleich- druck	Anwärmzeit	Umstellzeit	Fügezeit	Fügedruck
	[mm]	[°C]	[s]	[MPa]	[s]	[s]	[s]	[MPa]
Po- lyethy- len	10 x 50	200	20	0,10	100	< 5	80	0,10

Abbildung 38: Darstellung des gemessenen Kraft-, Weg- und Wärmestromverlaufs für einen Schweißprozess von Polyethylen

Im nachfolgenden sind die in Abbildung 38 dargestellten Prozessphasen im Detail erläutert. Weiterhin ist dargestellt, auf Grund welcher Gesetzmäßigkeit sich der Kurvenverlauf der Wärmestromaufzeichnung erklären lässt und wie

eine Inline-Qualitätssicherung realisiert werden kann. Die Inline-Qualitätssicherung wird hierbei an Hand einer abstrahierten Kurve dargestellt und es wird eine mögliche mathematische Approximation vorgestellt, welche den Kurvenverlauf zufriedenstellend beschreiben kann.

Abbildung 39 zeigt die ganzheitliche Abstraktion der Wärmestromaufzeichnung aus Abbildung 38. Die einfachste Möglichkeit einer Inline-Qualitätssicherung ist, eine Messkurve zu generieren und zu prüfen, ob darauffolgende Schweißprozesse wiederum Wärmestromkurven innerhalb des vorgegebenen Toleranzfeldes liefern oder nicht. Liegt die Messkurve innerhalb des Toleranzfeldes, so ist die Schweißung als „in Ordnung“ zu qualifizieren. Im Falle einer Abweichung, größer als das Toleranzfeld, ist die Schweißung mit hoher Wahrscheinlichkeit fehlerhaft und muss überprüft werden bzw. es müssen Maßnahmen getroffen werden, wie der Prozess weiterzuführen ist. Hierzu gehört auch, dass eine Bewertung notwendig ist, ob Maßnahmen (beispielsweise Verlängerung Angleich- oder Anwärmphase) existieren, mit denen die Schweißung noch den Qualitätsansprüchen genügen könnte. Zu diesem Zweck soll der Hintergrund des Entstehens der Abweichung näher erläutert werden. Die Wärmestromaufzeichnung wird hierzu in sieben relevante Prozessphasen aufgeteilt und jeweils erläutert, warum dieser Bereich charakteristisch ist und exemplarisch begründet, was zu einer Abweichung geführt haben könnte.

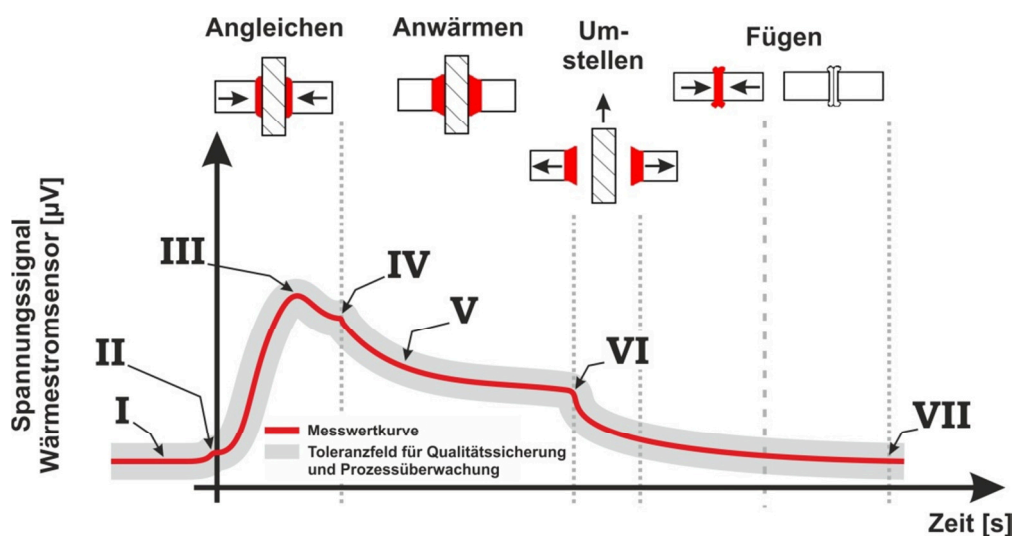


Abbildung 39: Abstrahierter Signalverlauf eines Wärmestromsensors für einen kompletten Schweißzyklus

### 7.1.1. Einrichtphase

#### 7.1.1.1. Darstellung anhand real gemessener Kurvenverläufe

In der Einrichtphase führt die hier verwendete Schweißmaschine eine Kompensation der so genannten Schleppkräfte durch. Dies bedeutet, dass der individuelle Einfluss des Probekörpergewichtes und der Masse der Einspannvorrichtung ermittelt und zu den gewünschten Schweißkräften addiert wird. Die Schleppkraftkompensation kann unabhängig der Antriebsart vorgenommen werden um sicherzustellen, dass vor allem bei schweren und häufig wechselnden Bauteilen die eingestellten Schweißparameter auch im Prozess eingehalten werden. In der Einrichtphase ist keine nennenswerte Wärmestromänderung zu erkennen. Lediglich die Kraft- und Wegaufzeichnung zeigt Veränderungen.

Der Wärmestromsensor liefert zwar keine Aussage zur Kraft- und Bewegungsführung in dieser Phase zur Bestimmung der Schleppkräfte, stellt dennoch sehr wichtige Informationen bezüglich des Prozesses zur Verfügung. Ein konstant verlaufender Wärmestromverlauf in dieser Phase ist die Voraussetzung dafür, dass das Gesamtsystem „Heizelement“ einer konstanten Regelung unterliegt und bereit für eine Schweißung ist. Diese Information ist vor allem nach dem Einschalten der Schweißmaschine von großer Bedeutung. Dass hier ein Mangel an Kontrollmöglichkeiten bezüglich der Homogenität der Heizelementoberfläche existiert, zeigt beispielsweise die DVS-Richtlinie 2208-1 (Schweißen von thermoplastischen Kunststoffen – Maschinen und Geräte für das Heizelementstumpfschweißen von Rohren, Rohrleitungsteilen und Tafeln) gemäß derer ein konventioneller Heizelementaufbau erst nach mindestens 30 Minuten Betriebsdauer eingesetzt werden sollte. Erst nach dieser Zeit wird von einem homogenen System ausgegangen. Ziel dieser langen Betriebsdauer im Vorfeld einer Schweißung ist, dass das Heizelement genügend Zeit bekommen muss, die Soll-Schweißtemperatur zu erreichen und sich thermisch zu homogenisieren. Mit Hilfe des Wärmestromsensors kann hier erstmals eine konkrete Aussage bezüglich des Heizelements getroffen werden, ob sich dies speziell in der Fügezone und auf der Oberfläche des Heizelements auf Schweißtemperatur und im thermischen Gleichgewicht befindet oder noch nicht. Je nach Heizelementaufbau konnten zum Teil deutlich geringere Aufheiz- und Homogenisierungszeiten mit Hilfe der Wärmestrombilanzierung festgestellt werden (siehe Abbildung 40).

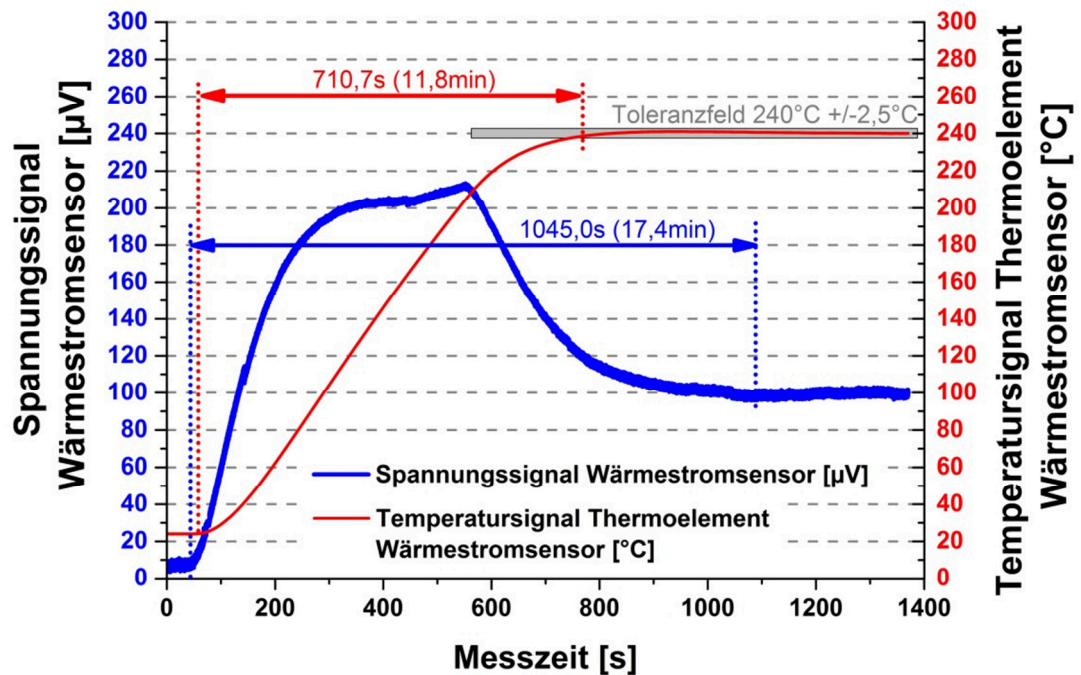


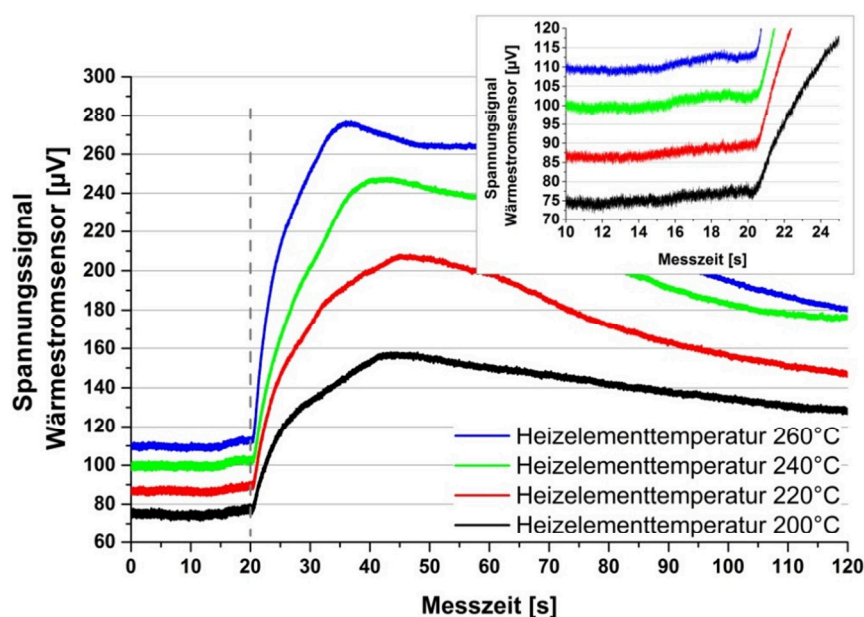
Abbildung 40: Aufzeichnung Spannungssignal Wärmestromsensor und Temperatursignal Thermoelement Wärmestromsensor für einen Aufheizvorgang des Heizelements von Raumtemperatur bis 240°C; Sensor Fa. ITI-Company; Auswertung der Aufheizzeit bis zur Homogenisierung laut Spannungssignal Wärmestromsensor und Temperatursignal Thermoelement Wärmestromsensor

Abbildung 40 zeigt für einen Aufheizvorgang von Raumtemperatur bis zu einer Heizelementtemperatur von 240°C das Spannungssignal des Wärmestromsensors und das Temperatursignal des Thermoelements im Wärmestromsensor. Zu erkennen ist, dass das Heizelement laut Thermoelement im Wärmestromsensor eine homogene Oberflächentemperatur von 240°C  $\pm$  2,5°C bereits nach 11,8min erreicht hat. Der Wärmestromsensor zeigt einen konstanten Verlauf nach 17,4min. Der Unterschied der Homogenisierungszeit zwischen Wärmestromsensor und Thermoelement ist zum einen begründet in der Einbauposition des Thermoelements bezogen auf die Einbauposition der Thermosäule und zum anderen dadurch, dass die Thermosäule ein über die Sensorfläche gemitteltes Signal darstellt. Die Thermosäule berücksichtigt die gesamte Oberfläche des Sensors, gibt eine für die gesamte Oberfläche repräsentative Aussage und stellt in diesem Falle das relevante Signal dar. Eine Homogenisierung nach 17,4min entspricht einer Zeitersparnis von 58% gegenüber der Vorgabe der DVS von 30min pro Aufheizvorgang. Zumal der Wert des Wärmestromsensors einen Kennwert darstellt, der individuell für jeden Aufheizvorgang gemessen werden kann und sowohl Maschi-

## 7. Ergebnisse und Diskussion

nen- als auch Umwelteinflüsse (jahreszeitlich bedingte Schwankungen etc.) berücksichtigt und der Wert der DVS lediglich ein Richtwert darstellt.

Die Schweißtemperatur ist dem Niveau des Wärmestroms zu entnehmen und die Homogenität dem konstanten Verlauf des Wärmestromsignals. Abbildung 41 zeigt, dass das Spannungssignal des Wärmestromsensors eine Aussage bezüglich der Heizelementtemperatur zulässt. In Abbildung 41 ist das Spannungssignal des Wärmestromsensors in Abhängigkeit der Messzeit für verschiedene Heizelementtemperaturen dargestellt.



Material	Polyethylen
Probekörperabmaße [mm]	10 x 50
Heizelementtemperatur [°C]	Siehe Grafik
Angleichzeit [s]	20
Angleichdruck [MPa]	0,10
Anwärmzeit [s]	100
Umstellzeit [s]	< 5
Fügezeit [s]	80
Fügedruck [MPa]	0,10
Sensor	ITI-Company

**Abbildung 41: Darstellung des Spannungssignals des Wärmestromsensors über die Messzeit für verschiedene Heizelementtemperaturen**



Es ist zu erkennen (in Abbildung 41), dass mit zunehmender Heizelementtemperatur auch das Signalniveau im Bereich der Einrichtphase steigt. Eine definierte Zunahme der Heizelementtemperatur führt zu einer definierten Zunahme des Sensorsignals. Im gezeigten Fall führt eine Erhöhung der Heizelementtemperatur um  $20^{\circ}\text{C}$  zu einer Signalerhöhung von circa  $12\text{ }\mu\text{V}$ .

Mit Hilfe aktueller Sensoren (ausgenommen Wärmestromsensoren) im Heizelementstumpfschweißprozess können keine derartigen Informationen gewonnen werden. Denn beispielsweise der Thermofühler zur Regelung der Heizelemente (vgl. Abbildung 19) befindet sich im Bereich der Heizpatronen im Zentrum des Heizelements. Folglich liefert dieser lediglich Informationen über die Kerntemperatur des Heizelements, was weder eine Aussage über die absolute Temperatur in der Fügeebene zulässt noch über die Homogenität der Fügeebene. Der Wärmestromsensor hingegen bietet erstmals die Möglichkeit, auch ohne Nutzung des im Wärmestromsensor integrierten Thermoelements, rein über die Thermosäule eine Aussage zum Betriebszustand des Heizelementes zu erlangen. Vor allem hilft die Tatsache, dass die Wärmestrominformation aus der Thermosäule eine, über die flächige Ausführung der Thermosäule, gemittelte Information darstellt und somit den kompletten Messbereich repräsentiert. Es kann natürlich als Ergänzung noch ein zusätzliches Thermoelement in den Wärmestromsensor integriert werden. Obwohl dies nicht als Voraussetzung gesehen werden kann, weil es technisch nicht immer umsetzbar ist, könnte ein solches Thermoelement sogar die Möglichkeit bieten, die Aussage der Thermosäule zu ergänzen, um beispielsweise eine noch höhere Genauigkeit und Sicherheit der Aussagekraft gewährleisten zu können. Mehr zum Einsatz und der Aussagekraft eines zusätzlichen Thermoelements ist im Abschnitt 7.4.5 erläutert.

### 7.1.1.2. Abstraktion für eine Inline-Qualitätssicherung

Abbildung 42 stellt die Abstraktion der Einrichtphase dar. Das Signalniveau des Wärmestromsensors  $U$  bzw. das Wärmestromsignal  $\dot{Q}$  ist, wie im Abschnitt 3 dargestellt, direkt proportional zum Temperaturgradienten  $d\vartheta$  sowie dem Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$  zwischen Sensoroberfläche und der Umgebungstemperatur. Da bei einem homogenen Heizelement sowohl die Temperaturdifferenz  $d\vartheta$ , als auch der Wärmedurchgangskoeffizient  $k$  kon-

## 7. Ergebnisse und Diskussion

stant sind, und sich die Oberflächentemperatur des Heizelements nicht nennenswert ändert und keine übermäßigen konvektiven Effekte stattfinden, verläuft die Sensorspannung und somit auch die Wärmestromkurve konstant (vgl. Gleichung 26 bis Gleichung 28).

Einrichtphase:

$$U \sim \dot{Q}$$

Gleichung 26

$$\dot{Q} \sim d\vartheta$$

Gleichung 27

$$\dot{Q} \sim k$$

Gleichung 28

mit  $k = \text{konstant}$  und  $d\vartheta = \text{konstant}$

Die Realisierung der Inline-Qualitätssicherung kann gemäß Abbildung 42 über den permanenten Abgleich des Spannungssignals des Wärmestromsensors  $U$  über die Messzeit  $t$  erfolgen. Ist das Spannungssignal  $U$  über eine definierte Zeit  $dt$  konstant, ist die Heizelementoberfläche soweit homogenisiert, dass der Schweißprozess begonnen werden kann (vgl. Gleichung 29).

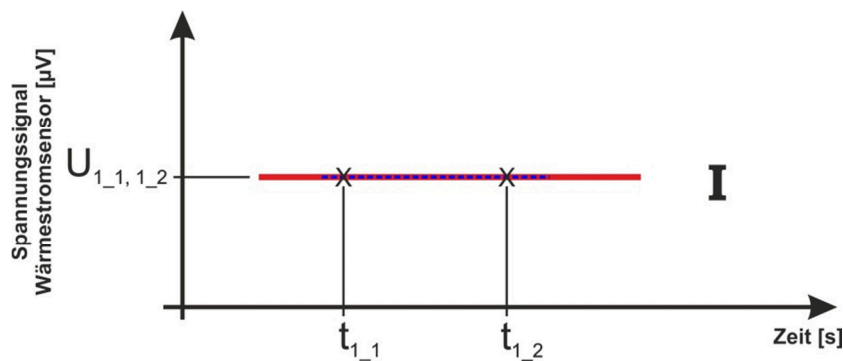


Abbildung 42: Abstraktion der Einrichtphase

Abstraktion Einrichtphase:

$$U_{1,1}(t_{1,1}) = U_{1,2}(t_{1,2})$$

Gleichung 29

für beispielsweise  $t_{1,2} - t_{1,1} = dt_1 = 20s$



Eine mathematische Approximation kann in dieser Prozessphase über eine Geradengleichung erfolgen. Die entsprechende Ableitung der mathematischen Approximation nach der Abszisse  $t$  liefert eine konstante Steigung  $m$ . Im Idealfall sollte  $m = 0$  sein (vgl. Gleichung 30 bis Gleichung 33).

---

**Mathematische Approximation Einrichtungphase:**

$$y = mx + b$$

**Gleichung 30**

bzw.

$$\dot{Q} = mt + b$$

**Gleichung 31****Ableitung der mathematischen Approximation Einrichtungphase:**

$$y' = m$$

**Gleichung 32**

bzw.

$$\dot{Q}' = m$$

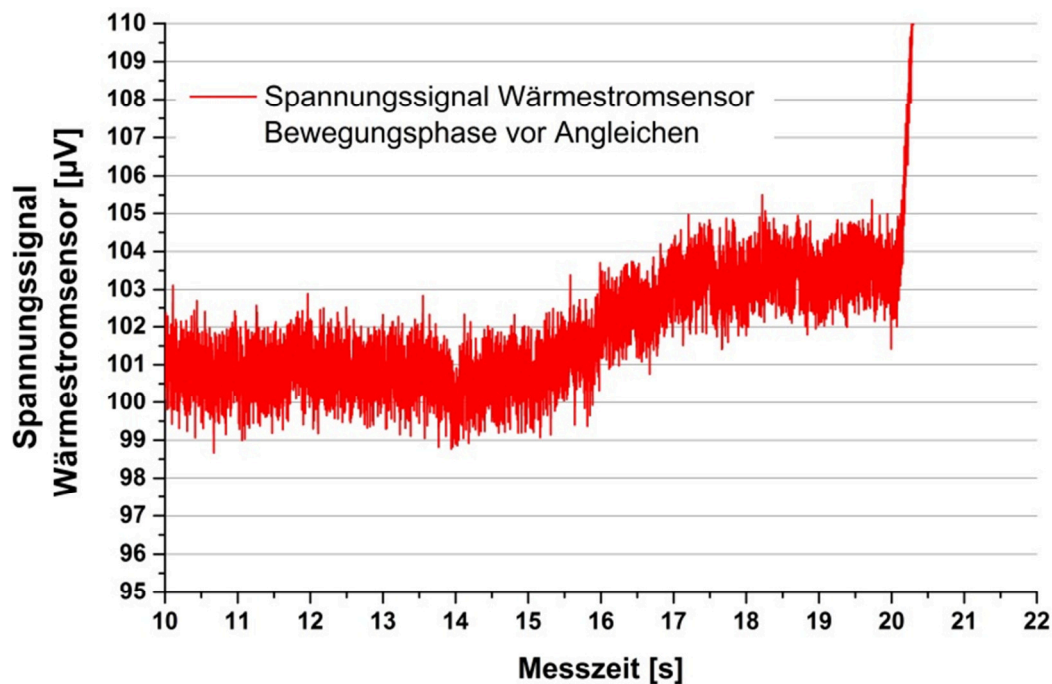
**Gleichung 33**mit im Idealfall  $m = 0$  bzw. stationärer Zustand

---

**7.1.2. Bewegungsphase vor Angleichen****7.1.2.1. Darstellung anhand real gemessener Kurvenverläufe**

In dieser Phase fahren sowohl die Fügeschlitten als auch das Heizelement in die Arbeitsposition. Das Spannungssignal des Wärmestromsensors zeigt in diesem Schritt einen kurzen Anstieg im Kurvenverlauf. Die Empfindlichkeit des Sensors reicht aus, um zu erkennen, ob sich das Heizelement in die Angleichposition bewegt hat oder nicht (vgl. Abbildung 43). Der kurze Anstieg des Spannungssignals in der Bewegungsphase des Heizelements vor dem Angleichen ist darin zu begründen, dass der Sensor auf Grund der Heizelementbewegung mit kälterer Luft in Berührung kommt und die Temperaturdifferenz  $d\vartheta$  zwischen Heizelement und Umgebungstemperatur während der Bewegung steigt. Da die Sensorspannung bzw. der Wärmestrom direkt proportional zur Temperaturdifferenz  $d\vartheta$  ist, steigt auch das Spannungssignal.

## 7. Ergebnisse und Diskussion



Material	Polyethylen
Probekörperabmaße [mm]	10 x 48
Heizelementtemperatur [°C]	260
Angleichzeit [s]	40
Angleichdruck [MPa]	0,10
Anwärmzeit [s]	100
Umstellzeit [s]	< 5
Fügezeit [s]	80
Fügedruck [MPa]	0,10
Sensor	ITI-Company
Mittelwert und Standardabweichung Messwert zwischen 10s und 14s [µV]	100,78 ± 0,79

**Abbildung 43: Darstellung des Spannungssignals des Wärmestromsensors über die Messzeit in der Bewegungsphase vor Angleichen**

### 7.1.2.2. Abstraktion für eine Inline-Qualitätssicherung

Ausschlaggebend für den Kurvenverlauf ist in dieser Prozessphase, dass die Sensorspannung und somit auch das Wärmestromniveau  $\dot{Q}$  direkt proportional zum Temperaturgradienten  $d\vartheta$  zwischen der Oberflächentemperatur des Sensors und der Umgebungstemperatur sind. Der Wärmedurchgangskoeffizient  $k$  kann in dieser Prozessphase als konstant angenommen werden (vgl. Gleichung 34 und Gleichung 35).



**Abstraktion Bewegungsphase vor Angleichen:**

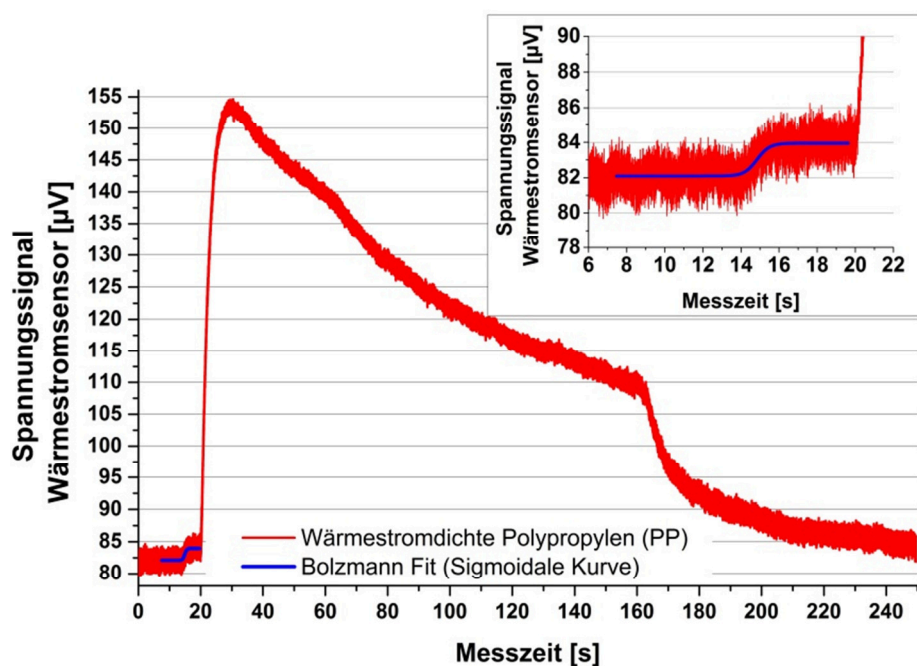
$$U_{2,1}(t_{2,1}) = U_{2,2}(t_{2,2}) - dU$$

**Gleichung 36**

mit  $dU = U_{2,2} - U_{2,1}$  und  $U_{2,2}(t_{2,2}) = U_{2,3}(t_{2,3})$   
 für beispielsweise  $t_{2,2} = dt_2 = 5s$

---

99



Material	Polypropylen
Probekörperabmaße [mm]	10 x 48
Heizelementtemperatur [°C]	200
Angleichzeit [s]	40
Angleichdruck [MPa]	0,10
Anwärmzeit [s]	100
Umstellzeit [s]	< 5
Fügezeit [s]	80
Fügedruck [MPa]	0,10
Sensor	ITI-Company
Korr. R-Quadrat	0,45

Abbildung 45: Darstellung des Spannungssignals des Wärmestromsensors über die Messzeit in der Bewegungsphase vor Angleichen

Zu erkennen ist, dass die sigmoidale Kurvenanpassung den Kurvenverlauf mit ausreichender Genauigkeit nachbilden kann. Der geringe Korrelationskoeffizient ist darauf zurückzuführen, dass ein verhältnismäßig starkes Rauschen des Sensorsignals vorliegt. Die sigmoidale Kurvenanpassung liefert als Charakterisierungskriterium für eine Qualitätssicherung die linke und rechte Asymptote, den Wendepunkt der Kurve und ein Maß für die Steigung (vgl. Gleichung 37).

Mathematische Approximation Bewegungsphase vor Angleichen:

$$y = A2 + \frac{(A1 - A2)}{1 + \exp \frac{x-x0}{dx}}$$

Gleichung 37

$A1$  = Anfangswert (linke Asymptote)

$A2$  = Endwert (rechte Asymptote)

$x0$  = Wendepunkt

$dx$  = Steigung der Sigmoidalfunktion im Punkt  $x0$

Die Kurve aus Abbildung 45 besitzt eine linke Asymptote  $A1$  bei  $82,1\mu\text{V}$ , eine rechte Asymptote  $A2$  bei  $84,0\mu\text{V}$ , einen Wendepunkt bei  $14,8\text{s}$  und eine Steigung im Wendepunkt von  $0,33$ .

### 7.1.3. Angleichphase

#### 7.1.3.1. Darstellung anhand real gemessener Kurvenverläufe

In der Bewegungsphase vor Angleichen nutzt die Maschine zum Annähern an das Heizelement eine Geschwindigkeit von  $25,0\text{mm/s}$  und eine Beschleunigung von  $150,0\text{mm/s}^2$  und nähert sich bis auf  $2\text{mm}$  dem Heizelement an. Die verbleibende Distanz von  $2\text{mm}$  zum Heizelement fährt die Schweißmaschine mit einer deutlich verringerten Geschwindigkeit von  $0,5\text{mm/s}$  (Beschleunigung  $150,0\text{mm/s}^2$ ). Ziel dieser Unterteilung ist eine zeitoptimierte Annäherung an das Heizelement bei gleichzeitiger Schonung der Antihafbeschichtung. Denn der zu fügende Kunststoff kann bei Raumtemperatur eine deutlich höhere Festigkeit als PTFE bei Schweißtemperatur besitzen.

Die Angleichphase erfolgt im vorgestellten Prozess zeitgeregelt. Ein definierter Angleichdruck wird für eine definierte Zeit, in diesem Falle  $20\text{s}$ , aufrecht gehalten, sodass sich eine gleichmäßige Anlagefläche des Probekörpers an das Heizelement ausbilden kann.

In diesem Prozessabschnitt können der Wegaufzeichnung nur sehr schwer Aussagen entnommen werden. Denn der Bereich, der gezielt abgeschmolzen wird, ist sehr gering und sollte im Idealfall gegen Null gehen. Das Ziel dieser Phase ist lediglich, dass der Probekörper flächig am Heizelement anliegt, ohne

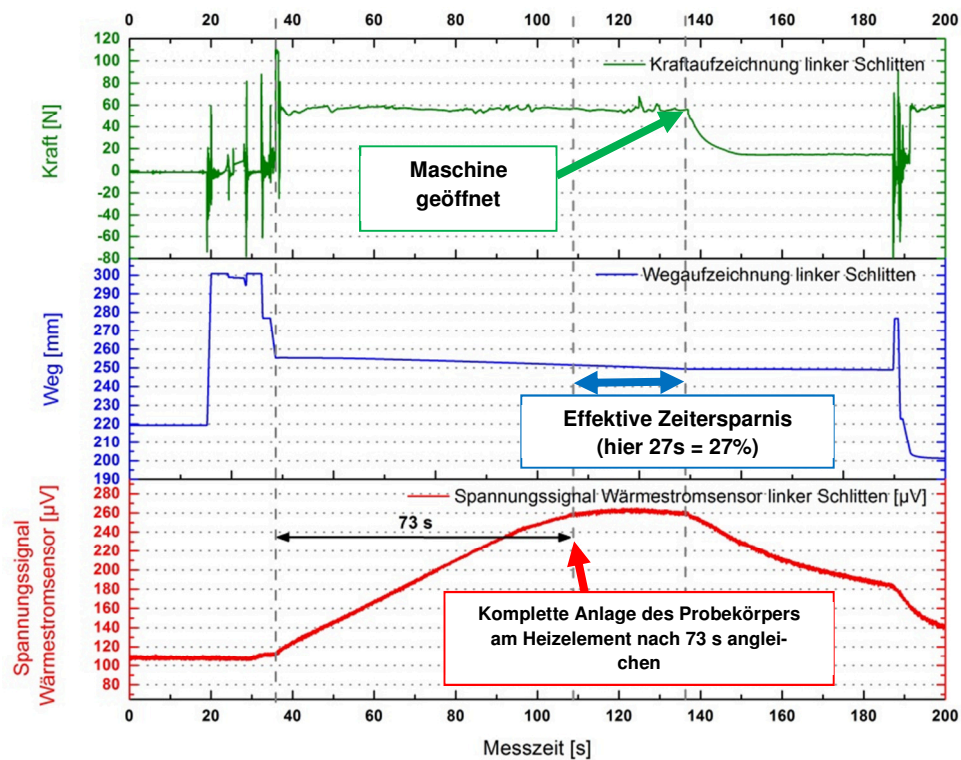
## 7. Ergebnisse und Diskussion

---

gezielt Material zu plastifizieren. Je mehr Material aufgeschmolzen und verdrängt wird, desto schlechter ist die Probenpräparation im Vorfeld dieses Schrittes zu werten. Große Abschmelzwege bedeuten zudem hohe Bauteiltoleranzen sowie Werkstoffverluste und gehen einher mit langen Zykluszeiten. Weiterhin fördern lange Angleichzeiten optisch große Schweißwulste, die je nach Produkt, kaschiert bzw. entfernt werden müssen.

Auch die Kraftaufzeichnung gibt keine detaillierten Informationen darüber, inwieweit in dieser Phase die Anlage des Probekörpers an das Heizelement ist oder wie lange die Angleichzeit sein sollte. Denn bei einem kraftgeregelten Schweißprozess wird der Druck vorgegeben und entsprechend auf diesen Druck geregelt, unabhängig welche Anlagefläche das Bauteil am Heizelement hat. Zudem unterliegt der Druck diversen Regelschwankungen, was eine reproduzierbare Auswertung stark erschwert und nahezu unmöglich macht.

Der Wärmestromsensor hingegen zeigt für den Probekörper charakteristische Kurvenverläufe. Zum einen kann auf Grund eines Wärmestromanstiegs im Detail detektiert werden, wann der Probekörper zum ersten Mal den Sensor und somit auch die Heizelementoberfläche berührt hat und zum anderen kann ermittelt werden, ob der Probekörper korrekt in die Spannvorrichtung eingelegt wurde. In Abbildung 46 wurde exemplarisch ein Probekörper so eingelegt, dass sich die Fügefläche nicht planparallel zum Heizelement befunden hat. Er wurde mit einer Schräglage weniger als drei Grad eingelegt. Die Angleichzeit wurde auf 100s erhöht und parallel zur Aufzeichnung des Spannungssignals des Wärmestromsensors eine optische Begutachtung des Angleichschritts durchgeführt. Die Auswertung des Sensorsignals lieferte das gleiche Ergebnis wie die optische Begutachtung. Der Probekörper lag erst nach etwa 73s flächig am Heizelement an und der Angleichvorgang hätte erst dann beendet werden können.



Material	Polyethylen
Probekörperabmaße [mm]	6 x 50
Heizelementtemperatur [°C]	260
Angleichzeit [s]	100
Angleichdruck [MPa]	0,10
Anwärmzeit [s]	100
Umstellzeit [s]	< 5
Fügezeit [s]	80
Fügedruck [MPa]	0,10
Sensor	ITI-Company

**Abbildung 46: Darstellung des Kraftverlaufs, Wegverlaufs und des Spannungssignals des Wärmestromsensors für einen bewusst schräg eingelegten Probekörper über die Messzeit**

In Abbildung 46 ist zu erkennen, dass der Anstieg des Spannungssignals des Wärmestromsensors nach etwa 73s stagniert. Dies zeigt, dass der Probekörper erst dann vollflächig am Heizelement anliegt. Der Anstieg der Kurve signalisiert, dass mit zunehmendem Abschmelzen des Probekörpers mehr Probekörperfläche in Kontakt mit dem Heizelement gebracht wird und der kalte Kunststoff dem Heizelement Wärme für die Plastifizierung entzieht.

## 7. Ergebnisse und Diskussion

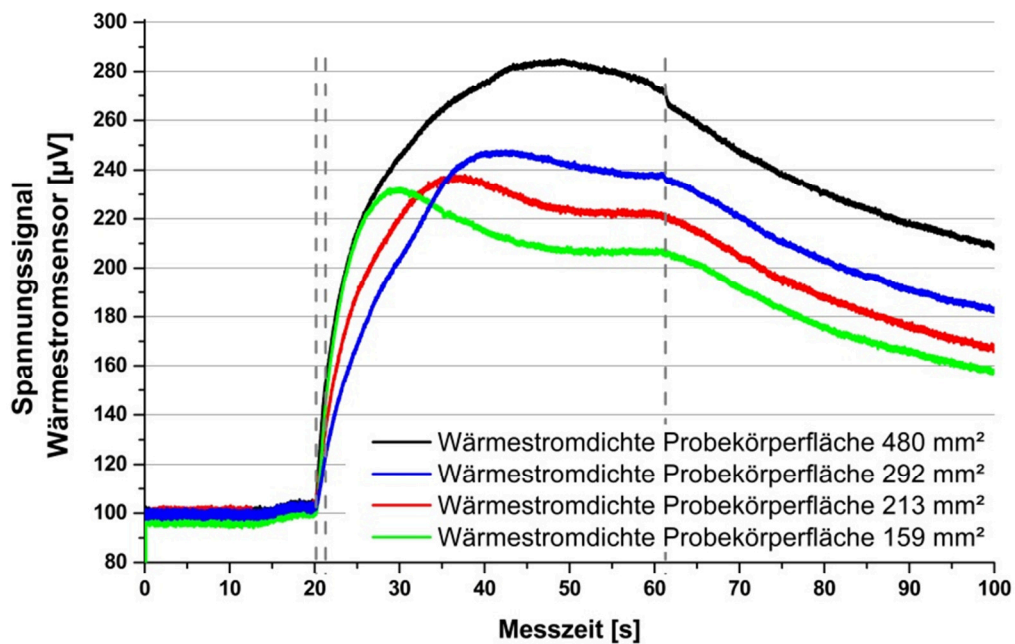
---

Das Stagnieren und der anschließende Abfall der Kurve sind dadurch zu erklären, dass nach den 73s keine weitere kalte Fügefläche mehr auf dem Heizelement zur Anlage kommt und in Folge dessen das Spannungssignal stagniert. Der unmittelbar daran anschließende Abfall des Wärmestroms, wenige Sekunden nach der vollflächigen Anlage des Kunststoffes auf dem Heizelement, kann als Konsequenz dadurch erklärt werden, dass die am Sensor anliegende Kunststoffgrenzschicht nahezu komplett plastifiziert ist und bedingt durch den sinkenden Temperaturgradienten zwischen Heizelementoberfläche und Füge-teiloberfläche das Sensorsignal sinkt.

Erneut anzumerken ist, dass es weder über den Kraftverlauf noch über die Wegaufzeichnung möglich ist, eine zuverlässige Aussage über die Anlagesituation des Probekörpers in der Angleichphase zu treffen. Da bei einer Schräganlage ein Teil des Probekörpers am Heizelement anliegt, kann ein Gegendruck über längere Zeit aufgezeichnet werden, obwohl keine vollflächige Anlage des Probekörpers vorliegt. Auch der Wegsensor zeigt keine signifikanten großen Abschmelzwege. Das Signal des Wärmestromsensors ist hier die einzige Möglichkeit, eine zuverlässige Aussage über die Anlagefläche im Angleichschritt zu erhalten. Die Interpretation dieses Sachverhaltes eignet sich ideal für eine Inline-Qualitätssicherungsmaßnahme, da die Kurve direkt genutzt werden kann, um eine Aussage über Bauteiltoleranzen oder -fehler zu erhalten.

Um zu zeigen, dass die Sensorspannung oberflächensensitiv ist, wurden gezielt Versuche mit unterschiedlichen Probekörpergeometrien durchgeführt. Abbildung 46 zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchungen.





Material	Polyethylen
Probekörperabmaße [mm]	Siehe Grafik
Heizelementtemperatur [°C]	260
Angleichzeit [s]	40
Angleichdruck [MPa]	0,10
Anwärmzeit [s]	100
Umstellzeit [s]	< 5
Fügezeit [s]	80
Fügedruck [MPa]	0,10
Sensor	ITI-Company

**Abbildung 47: Darstellung des Spannungssignals des Wärmestromsensors über die Messzeit für verschiedene Probekörperflächen**

Wie erwartet, zeigt Abbildung 47, dass mit zunehmender Wirkfläche (Fügefläche) auch die Signalspannung steigt. Weiterhin ist zu erkennen, dass mit zunehmender Fläche sich das Maximum der Kurve zu längeren Messzeiten verschiebt. Dies spiegelt wider, dass bei größeren Probekörpergeometrien mehr Fläche plastifiziert werden muss, weil statistisch mehr Unebenheiten vorliegen und deshalb längere Angleichzeiten notwendig sind. Alle vier gezeigten Schweißungen können, anhand des Spannungssignals und den bisher gewonnen Erkenntnissen hinsichtlich der Zykluszeit, optimiert werden, da das Maximum des Spannungssignals bei allen dargestellten Schweißungen deutlich überschritten wurde. Beim Probekörper mit einer Anlagefläche von 159mm<sup>2</sup>

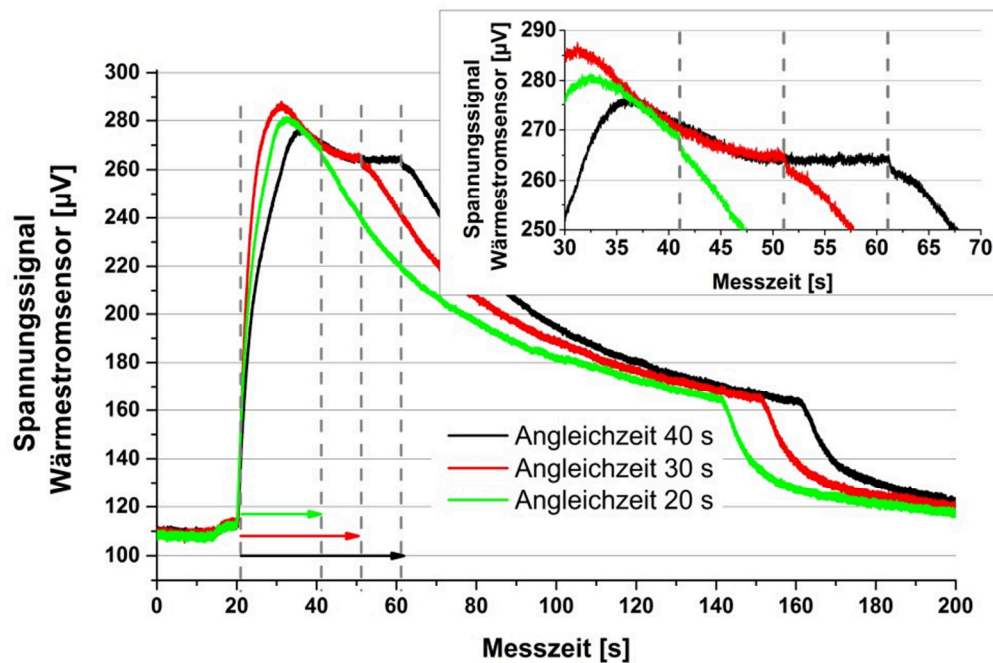
## 7. Ergebnisse und Diskussion

---

könnte die Angleichzeit theoretisch um mehr als 50% reduziert werden, was die Effizienz des Prozesses stark steigern würde.

Die Wegaufzeichnung sollte theoretisch die Grundlage für eine ähnliche Detektion liefern. Denn zunächst sollte sich beim Abschmelzen eine relativ schnelle Wegänderung bemerkbar machen, welche mit zunehmender Anlagefläche abnimmt. Allerdings besteht das größte Defizit, wie bereits erwähnt, in der Auflösung des Messsignals und einer entsprechenden Interpretation dieses Signals. Denn hinzu kommt, dass bedingt durch die thermische Ausdehnung des Materials bei langen Angleichzeiten der Wegverlauf verfälscht wird und auch wieder zunehmen kann, besonders bei einer undefinierten Anlage des Probekörpers. Die Thermosäule im Wärmestromsensor liefert zwar ähnlich der Wegmessung ein Spannungssignal, jedoch ist dies auf Grund der Reihenschaltung vieler Spannungsquellen (gleichbedeutend mit Thermoelementen) deutlich stärker und kann entsprechend besser aufgelöst werden. Weiterhin liefert der Wärmestromsensor einen über die Fläche der Thermosäule integrierten Messwert, der deutlich aussagekräftiger ist und direkt aus der Fügeebene stammt.

Abschließend wurde in dieser Phase noch untersucht, ob sich unterschiedliche Angleichzeiten über die Aufzeichnung und Auswertung des Spannungssignals des Wärmestromsensors sicher erkennen lassen. Abbildung 48 zeigt die Ergebnisse dieser Studie. Die Angleichzeiten sind in der Spannungsaufzeichnung über eine Stufe im Kurvenverlauf ersichtlich.



Material	Polyethylen
Probekörperabmaße [mm]	6 x 50
Heizelementtemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]	260
Angleichzeit [s]	Siehe Grafik
Angleichdruck [MPa]	0,10
Anwärmzeit [s]	100
Umstellzeit [s]	< 5
Fügezeit [s]	80
Fügedruck [MPa]	0,10
Sensor	ITI-Company

**Abbildung 48: Darstellung des Spannungssignals des Wärmestromsensors über die Messzeit für verschiedene Angleichzeiten**

Die genaue Angleichzeit könnte in diesem Fall lediglich der Kraftaufzeichnung, jedoch nicht der Wegaufzeichnung entnommen werden.

An dieser Stelle sei noch erwähnt, dass die Aufzeichnung des Spannungssignals eine Detektion ermöglicht, ob der Angleichvorgang reproduzierbar abläuft oder nicht und ob dieser stattgefunden hat oder nicht. Denn sobald beispielsweise eine Verschmutzung oder eine Schwergängigkeit der Fügeschlitten dazu führt, dass sich eine Gegenkraft aufbaut, obwohl der Probekörper das Heizelement noch nicht berührt hat, könnte dies mit einem Wärmestromsensor zuverlässig erkannt werden. Dies ist vor allem bei Schweißmaschinen sehr interessant, bei denen der Probekörper direkt in der Maschine unmittelbar vor dem Schweißen gehobelt wird, um die so genannte Oxid-

schicht zu entfernen und die Angleichzeit zu verringern. Typisch ist dies bei Schweißungen von Kunststoffrohren. Hier entstehen durch das Hobeln Späne, die die Schweißmaschine verschmutzen und meist manuell aus der Fügezone entnommen werden. Ein Wärmestromsensor könnte hier zeigen, ob die Fügezone sauber war und ob eine zufriedenstellende Plastifizierung der Fügepartner stattgefunden hat.

Ein weiterer Punkt betrifft die Ausbildung der Angleichphase. Abbildung 47 und Abbildung 48 zeigen trotz Laborbedingungen Unterschiede bezüglich der Kurvenform in der Angleichphase. Ein spezielles Augenmerk soll in diesem Falle nicht auf die Messzeit gelegt werden, bei der die Kurve ein Maximum durchläuft, sondern auf die Kurvenform an sich. Es ist auffällig, dass jede Probe einen individuellen Kurvenverlauf hervorruft und dass sich beispielsweise die Kurvenverläufe in Abbildung 48 sogar schneiden. Dies ist begründet darin, dass trotz Laborbedingungen und reproduzierbarer Probenpräparationen jede Probe eine individuelle Anzahl an Unebenheiten und Oberflächenfehlern aufweist und diese im Angleichschritt abgeschmolzen werden. Diese hat zur Folge, dass je nach Anzahl und Intensität der Unebenheiten sich die Anlage an das Heizelement ändert und entsprechend das Sensorsignal. In diese Betrachtung kann natürlich auch die Reproduzierbarkeit der Einlegeposition und die Planparallelität zwischen Probekörper und Heizelement mit einbezogen werden. Auch dies beeinflusst den Kurvenverlauf. In der Anwärmphase ist dieser Effekt nicht ausgeprägt, weil die Proben durch die Angleichphase einen nahezu idealen Kontakt zum Heizelement bekommen und kein weiteres Material verdrängt wird. Es kann hier lediglich der Wärmetransport vom Heizelement in den zu fügenden Kunststoff detektiert werden.

### 7.1.3.2. Abstraktion für eine Inline-Qualitätssicherung

Die Angleichphase ist in Abbildung 49 abstrahiert dargestellt. Wie bereits erwähnt, kann dieser Punkt mit Hilfe eines Spannungssignals des Wärmestromsensors detektiert werden, weil das Spannungssignal  $U$  und somit auch das Wärmestromsignal  $\dot{Q}$  zunächst auf Grund eines Temperaturgradienten  $d\vartheta$  zwischen Heizelementoberfläche und kaltem Kunststoff stark ansteigt. Der Anstieg findet solange statt, bis kein kalter Kunststoff mehr zur Anlage auf dem Sensor kommt, folglich Unebenheiten und Bauteiltoleranzen abge-

schmolzen sind und ein flächiges Anliegen des Kunststoffes vorliegt. Infolge dessen stagniert der Spannungsverlauf. Sinkt nun der Temperaturgradient  $d\vartheta$  zwischen Heizelement und Kunststoff, es setzt also eine gleichmäßige Plastifizierung des Kunststoffes ein, sinkt infolge dessen auch das Sensorsignal. Auch hier ist die direkte Proportionalität zwischen Wärmestrom und Temperaturgradient ausschlaggebend für den Kurvenverlauf. Obwohl der Kunststoff einen Phasenübergang Feststoff-Schmelze vollzieht, kann die Proportionalität von Wärmestrom und Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$  vernachlässigt werden. Der Wärmedurchgangskoeffizient und die darin verborgenen Materialeigenschaften treten erst dann deutlich in Erscheinung, wenn der Temperaturgradient zwischen Heizelementoberfläche und Formteiloberfläche als sehr klein angenommen werden kann (vgl. Gleichung 38).

$$U \sim \dot{Q} \sim d\vartheta$$

Gleichung 38

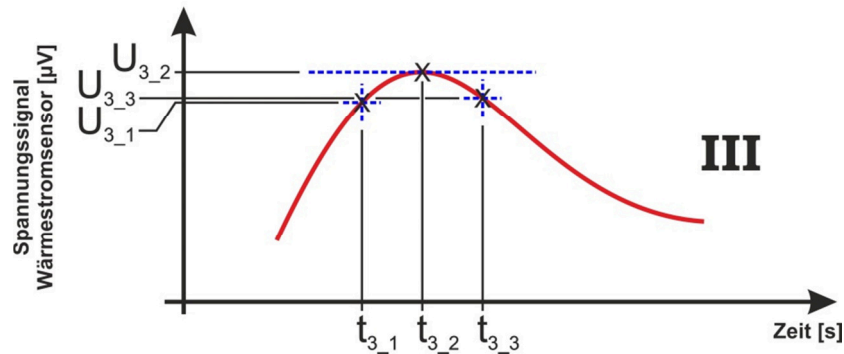


Abbildung 49: Abstraktion der Angleichphase

Sobald ein Stagnieren von  $U$  einsetzt, kann davon ausgegangen werden, dass der Angleichschritt beendet und der Anwärmesritt begonnen werden kann. Eine Inline-Qualitätssicherung kann über das Erkennen des Wendepunktes realisiert werden oder über eine Aufzeichnung der Steigung im entsprechenden Zeitintervall die Maschine steuern (vgl. Gleichung 39 und Gleichung 40).

## 7. Ergebnisse und Diskussion

Abstraktion Angleichphase:

Aktives Angleichen solange  $U_{3,2}(t_{3,2}) - U_{3,1}(t_{3,1}) > 0$

Gleichung 39

Ende Angleichen sobald  $U_{3,3}(t_{3,3}) - U_{3,2}(t_{3,2}) < 0$

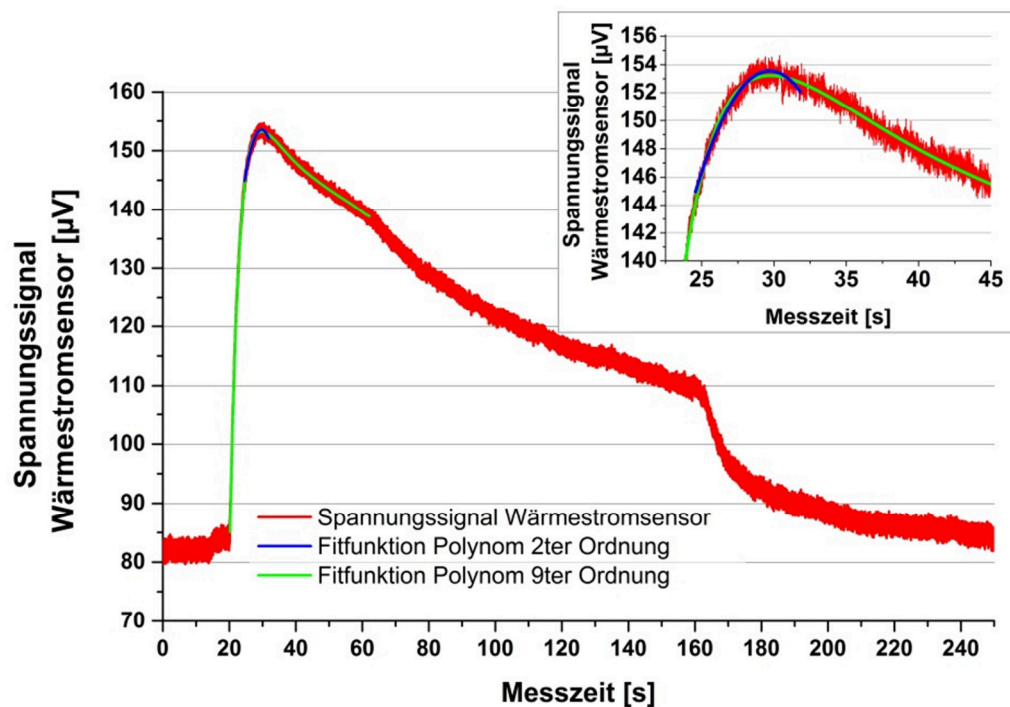
Gleichung 40

Ende Angleichen nach Einhaltung einer Sicherheitszeit  $t$  entspricht

$U_{3,3}(t_{3,3}) + t$

Sicherheitszeit beispielsweise  $t = 3s$

Eine mathematische Beschreibung des Angleichvorgangs kann im Bereich des Wendepunktes über ein Polynom zweiter Ordnung beschrieben werden, welches ein zufriedenstellendes Ergebnis bezüglich des Wendepunktes liefert. Die ganzheitliche Beschreibung des Angleichvorgangs kann allerdings nur über ein Polynom höheren Grades erfolgen (vgl. Abbildung 50).



Material	Polypropylen
Probekörperabmaße [mm]	6 x 50
Heizelementtemperatur [°C]	200
Angleichzeit [s]	40
Angleichdruck [MPa]	0,10
Anwärmzeit [s]	100
Umstellzeit [s]	< 5
Fügezeit [s]	80
Fügedruck [MPa]	0,10
Sensor	ITI-Company
Korr. R-Quadrat Polynom 2ter Ordnung	0,950
Korr. R-Quadrat Polynom 9ter Ordnung	0,997

**Abbildung 50: Darstellung möglicher Fitfunktionen für die Angleichphase des Spannungssignals des Wärmestromsensors über die Messzeit**

Die mathematische Approximation über ein Polynom zweiter Ordnung liefert den Streckungsfaktor  $a$  und somit die Form des Spannungsverlaufes im Bereich des Scheitels, einen Koeffizienten  $b$  sowie den y-Achsenabschnitt  $c$ . Drei Parameter, die für eine mathematische Charakterisierung herangezogen werden können. Weiterhin kann über die Ableitung und die Bestimmung der Nullstellen festgestellt werden, wo sich im Detail der Wendepunkt und somit der optimale Angleichzeitpunkt befindet. Für den in Abbildung 50 gezeigten Fall ist der Streckungsfaktor der Parabel  $a = -0,33\mu\text{V/s}^2$ , d.h. die Parabel ist gestaucht, der Koeffizient  $b = 19,3\mu\text{V/s}$ , der Y-Achsenabschnitt  $c = -134,44\mu\text{V}$  und der Wendepunkt bei  $t = 29,2\text{s}$  (vgl. Gleichung 41 bis Gleichung 44).

## 7. Ergebnisse und Diskussion

---

Mathematische Approximation Angleichphase:

$$y = ax^2 + bx + c$$

Gleichung 41

bzw.

$$U = at^2 + bt + c$$

Gleichung 42

$a$  = Streckungsfaktor der Parabel

$b$  = Koeffizient

$c$  = y-Achsenabschnitt

Ableitung der mathematischen Approximation Angleichphase:

$$y' = 2ax + b$$

Gleichung 43

bzw.

$$U' = 2at + b$$

Gleichung 44

Wendepunktbestimmung über  $U' = 0$  und somit  $t = \frac{-b}{2a}$

Das Ende der Angleichphase kann über einen Sprung der Sensorspannung des Wärmestromsensors gemäß Abbildung 51 detektiert werden. Der Sprung zwischen Angleichphase und Anwärmphase entsteht, weil der Angleichdruck schlagartig auf nahe Null reduziert wird, kein Material mehr aus der Erwärmzone verdrängt und somit auch kein kälteres Material nachgeschoben wird. Der dominierende Vorgang ist auch hier beschrieben über die direkte Proportionalität zwischen Sensorspannung  $U$  und dem Temperaturgradient  $d\vartheta$  zwischen Heizelement und Bauteiloberfläche (vgl. Gleichung 45).

$$U \sim d\vartheta$$

Gleichung 45



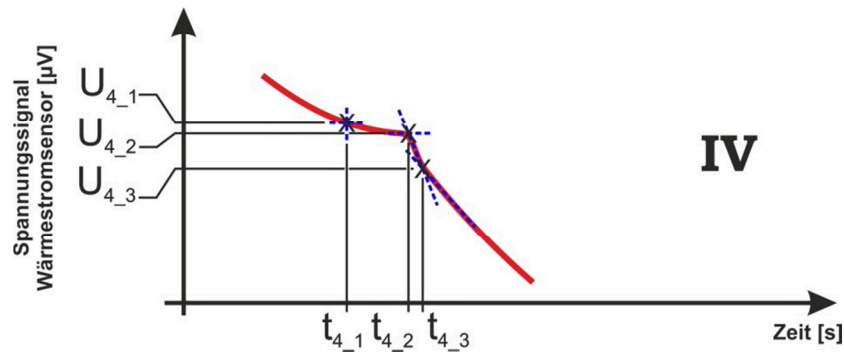


Abbildung 51: Abstraktion Ende der Angleichphase

Eine Detektion des Endes der Angleichphase kann wie folgt realisiert werden (vgl. Gleichung 46).

$$U_{4,3}(t_{4,3}) - U_{4,2}(t_{4,2}) > U_{4,2}(t_{4,2}) - U_{4,1}(t_{4,1})$$

Gleichung 46

Eine mathematische Approximation kann beispielsweise über zwei Geradengleichungen erfolgen. Sobald sich die Ableitung bzw. die Steigung der Geradengleichung signifikant ändert, ist der Umschaltzeitpunkt erreicht.

Eine weitere Möglichkeit, die aber an dieser Stelle nicht im Detail ausgeführt werden soll, besteht darin, nach der Berechnung des Wendepunktes die Kurve nach dem Wendepunkt über eine asymptotische Fitfunktion zu charakterisieren und einen Schnittpunkt zwischen dieser Asymptote und der Asymptote der Anwärmfunktion zu bilden.

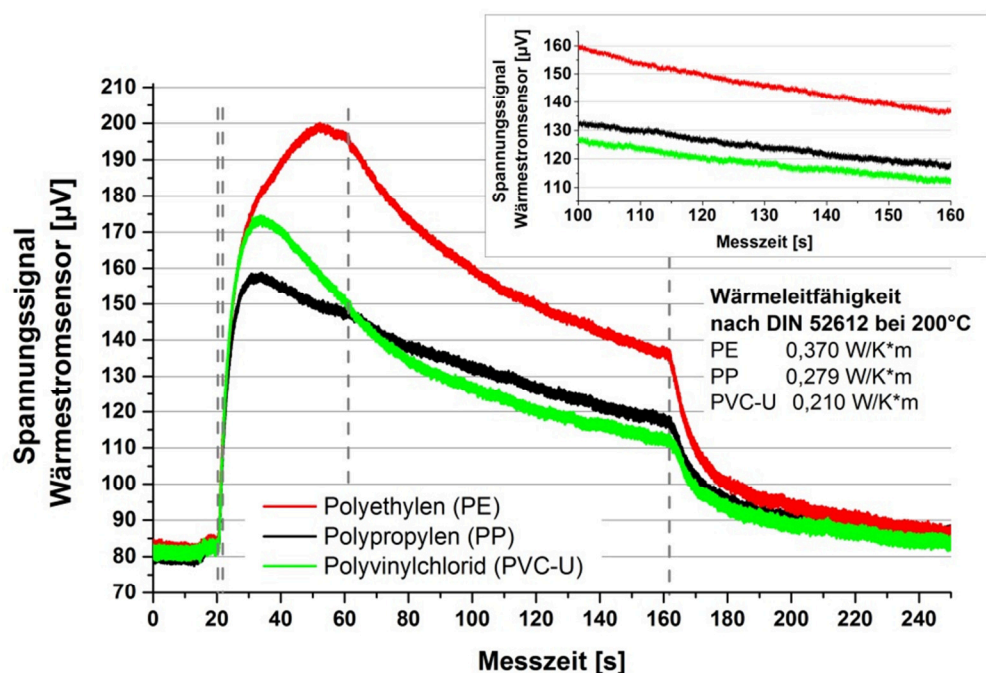
#### 7.1.4. Anwärmphase

##### 7.1.4.1. Darstellung anhand real gemessener Kurvenverläufe

In der Anwärmphase ist die Zielsetzung, möglichst definiert eine Schmelzschicht aufzubauen, die im Fügschritt zu einer qualitativ hochwertigen Schweißnaht führt. Abbildung 52 zeigt das Spannungssignal des Wärmestromsensors für einen Schweißzyklus für drei verschiedene Materialien. Zu erkennen ist, dass sowohl in der Angleichphase als auch in der Anwärmphase sich trotz gleicher Schweißparameter Unterschiede im Signalverlauf zeigen. Ein besonderes Augenmerk soll auf die Anwärmphase gelegt werden, in der sich ein materialspezifischer asymptotischer Kurvenverlauf einstellt. Der

## 7. Ergebnisse und Diskussion

asymptotische Kurvenverlauf ist dadurch zu erklären, dass ein sinkender Temperaturgradient zwischen Heizelement und Bauteiloberfläche, überlagert mit den Auswirkungen der entsprechenden Materialkennwerte (vorwiegend der Wärmeleitung) einen materialspezifischen Signalverlauf ergeben. Zu Beginn der Anwärmphase dominiert der sinkende Temperaturgradient, was zu einem starken Abfall des Spannungssignals führt. Mit zunehmender Anwärmzeit stagniert dieser jedoch, weil der Temperaturgradient klein wird und die Wärmeleitung im Material dominiert. Es stellt sich eine materialcharakteristische Wärmeleitung ein, der sich die Asymptote annähert.



Material	Siehe Grafik
Probekörperabmaße [mm]	6 x 50
Heizelementtemperatur [°C]	200
Angleichzeit [s]	40
Angleichdruck [MPa]	0,10
Anwärmzeit [s]	100
Umstellzeit [s]	< 5
Fügezeit [s]	80
Fügedruck [MPa]	0,10
Sensor	ITI-Company

Abbildung 52: Darstellung des Spannungssignals des Wärmestromsensors über die Messzeit für verschiedene Materialien

Die Abbildung 52 zeigt, dass, wie erwartet, das Spannungsniveau mit der Wärmeleitfähigkeit des geschweißten Materials korreliert.

#### 7.1.4.2. Abstraktion für eine Inline-Qualitätssicherung

Die Abstraktion des Kurvenverlaufs in der Anwärmphase zeigt Abbildung 53. Zu erkennen ist, dass die Signalspannung des Wärmestromsensors bei geringen Anwärmzeiten einen starken Abfall aufweist und mit zunehmender Anwärmzeit langsamer abflacht. Grund hierfür ist, dass das Spannungssignal  $U$  bzw. der Wärmestrom  $\dot{Q}$  direkt proportional zur Temperaturdifferenz  $d\vartheta$  zwischen dem Heizelement und der Fügeiteiloberfläche und gleichzeitig direkt proportional zur Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  bzw. zur Temperaturleitfähigkeit  $\alpha$  ist (vgl. Gleichung 47 und Gleichung 48).

$$U \sim d\vartheta$$

Gleichung 47

$$U \sim \lambda \text{ bzw. } U \sim \alpha$$

Gleichung 48

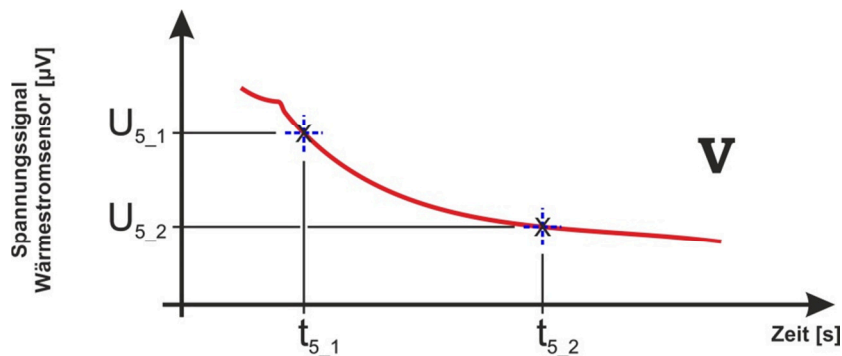


Abbildung 53: Abstraktion der Anwärmphase

Im Bereich geringer Anwärmzeiten dominiert die direkte Proportionalität zwischen dem Spannungssignal des Wärmestromsensors  $U$  und der Temperaturdifferenz  $d\vartheta$ . Da sich die Probe erwärmt und die Temperaturdifferenz  $d\vartheta$  immer geringer wird, gewinnt die Proportionalität zwischen Sensorsignal  $U$  und Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  immer mehr an Bedeutung und das Sensorsignal nähert sich einem konstanten Wert an, der geprägt ist durch die materialspezifische Wärmeleitung  $\lambda$  des Kunststoffes. Der Kunststoff nimmt folglich nur noch so viel Wärme auf, wie er auch über Wärmeleitung transportieren kann.

## 7. Ergebnisse und Diskussion

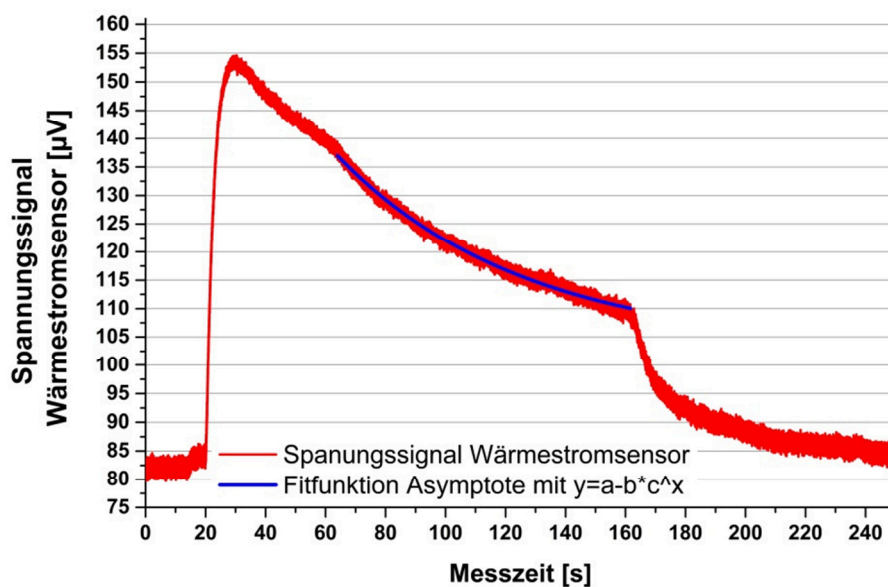
Der charakteristische Verlauf kann über eine permanente Erfassung der Steigung der Kurve einer Inline-Qualitätssicherung zugeführt werden (vgl. Gleichung 49).

Aufzeichnung von:

$$U_{5,2}(t_{5,2}) - U_{5,1}(t_{5,1})$$

Gleichung 49

Eine mathematische Approximation zeigt Abbildung 54 (vgl. Gleichung 50 und Gleichung 51).



Material	Polypropylen
Probekörperabmaße [mm]	6 x 50
Heizelementtemperatur [°C]	200
Angleichzeit [s]	40
Angleichdruck [MPa]	0,10
Anwärmzeit [s]	100
Umstellzeit [s]	< 5
Fügezeit [s]	80
Fügedruck [MPa]	0,10
Sensor	ITI-Company
Kor. R-Quadrat	0,991

Abbildung 54: Darstellung einer möglichen Fitfunktion für die Anwärmphase des Spannungssignals des Wärmestromsensors über die Messzeit

Mathematische Approximation Anwärmphase:

$$y = a - b \cdot c^x$$

Gleichung 50

bzw.

$$U = a - b \cdot c^{t_{\text{Anwärm}}}$$

Gleichung 51

mit

$a$  = Asymptote

$b$  = Funktionsbereich

$c$  = Faktor

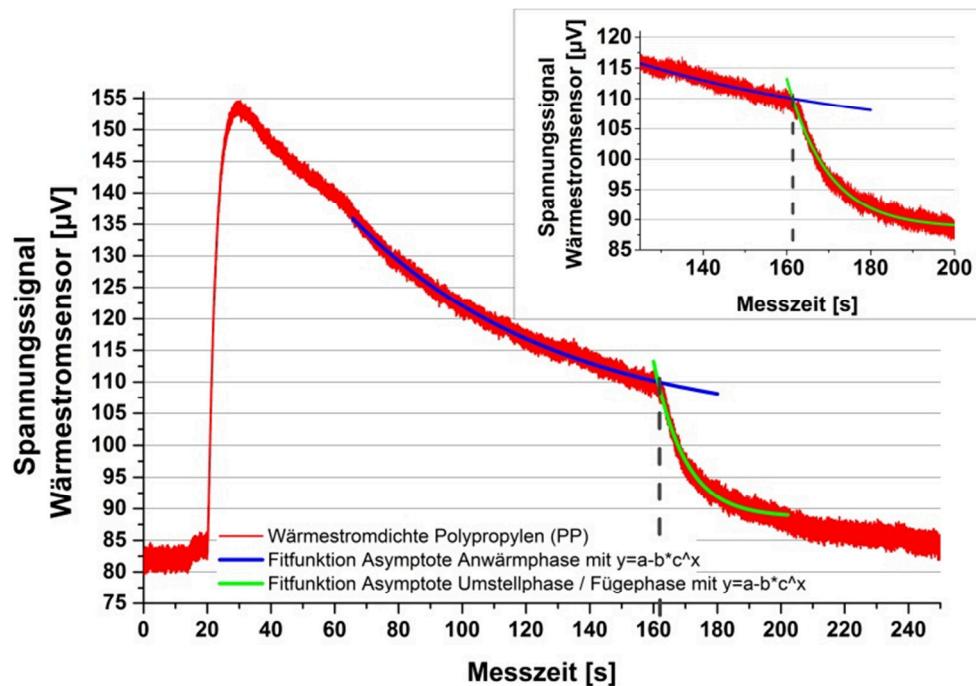
Im dargestellten Fall ergeben sich folgende Werte der mathematischen Approximation: Der Graph nähert sich einer Asymptote von  $a = 102,88$  an mit einem Funktionsbereich von  $b = -94,75$  und einem Faktor  $c = 0,984$ . Mit Hilfe der asymptotischen Approximation lässt sich mit zufriedenstellender Genauigkeit der Verlauf im Bereich der Anwärmphase darstellen.

### 7.1.5. Umstellphase

#### 7.1.5.1. Darstellung anhand real gemessener Kurvenverläufe

In der Umstellphase wird der Kunststoff vom Heizelement abgezogen und das Heizelement bewegt sich aus der Fügezone. Das Abziehen des Kunststoffes vom Heizelement hat zur Folge, dass der Wärmestromsensor keinen Kontakt mehr zum Kunststoff besitzt und in dieser Phase charakteristische Kurvenverläufe für das Heizelement zeigt. Dank des Sensors ist es möglich, einen exakten Zeitpunkt des Abhebens des Kunststoffes vom Sensor und somit auch vom Heizelement zu detektieren und zu protokollieren.





Material	Polypropylen
Probekörperabmaße [mm]	6 x 50
Heizelementtemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]	200
Angleichzeit [s]	40
Angleichdruck [MPa]	0,10
Anwärmzeit [s]	100
Umstellzeit [s]	< 5
Fügezeit [s]	80
Fügedruck [MPa]	0,10
Sensor	ITI-Company
Kor. R-Quadrat Anwärmphase	0,991
Kor. R-Quadrat Umstell- bzw. Fügephase	0,957

Abbildung 56: Darstellung einer möglichen Fitfunktion für die Anwärmphase des Spannungssignals des Wärmestromsensors über die Messzeit

## 7. Ergebnisse und Diskussion

---

Mathematische Approximation Umstellphase:

$$y = a - b \cdot c^x$$

Gleichung 53

bzw.

$$\dot{q} = a - b \cdot c^{t_{Anwärm}}$$

Gleichung 54

mit

$a$  = Asymptote

$b$  = Funktionsbereich

$c$  = Faktor

Detektion Umstellphase:

$$\dot{q}_{Anwärm} = \dot{q}_{Abkühl}$$

Gleichung 55

---

Die genaue Ermittlung des Umstellzeitpunktes kann über den Schnittpunkt der beiden Approximationen der Anwärmphase und der Fügephase erfolgen (vgl. Gleichung 56 bis Gleichung 59).

Mathematische Approximation Anwärmphase:

$$y_{An} = a_{An} - b_{An} \cdot c_{An}^x$$

Gleichung 56

Mathematische Approximation Umstellphase:

$$y_{Um} = a_{Um} - b_{Um} \cdot c_{Um}^x$$

Gleichung 57

Ermittlung des Schnittpunktes über:

$$y_{An} = y_{Um}$$

Gleichung 58

$$a_{An} - b_{An} \cdot c_{An}^x = a_{Um} - b_{Um} \cdot c_{Um}^x$$

Gleichung 59

Da die Gleichung nicht algebraisch gelöst werden kann, werden die jeweiligen Parameter eingesetzt und die Gleichung auf numerischem Wege gelöst

$$a_{An} = 102,88$$

$$b_{An} = -94,75$$

$$c_{An} = 0,984$$

---



$$a_{Um} = 88,64$$

$$b_{Um} = -0,247 \cdot 10^9$$

$$c_{Um} = 0,904$$

Numerische Lösung mittels Wolfram Mathematica 9.0:

(Berechnungszeile:  $\text{FindRoot}[102.88 + 94.750.984^x == 88.64 + 2.47 \times 10^8 0.904^x, \{x, 1\}]$ )

$$x_{\text{Schnittpunkt\_Anwärmphase\_Umstellphase}} = 161,18$$

(d.h. der Schnittpunkt und somit der Umstellzeitpunkt befindet sich bei 161,18s)

Zur Berechnung des y-Achsenabschnitts kann eine der Approximationsgleichungen herangezogen werden.

$$y_{\text{Schnittpunkt\_Anwärmphase\_Umstellphase}} = 109,92$$

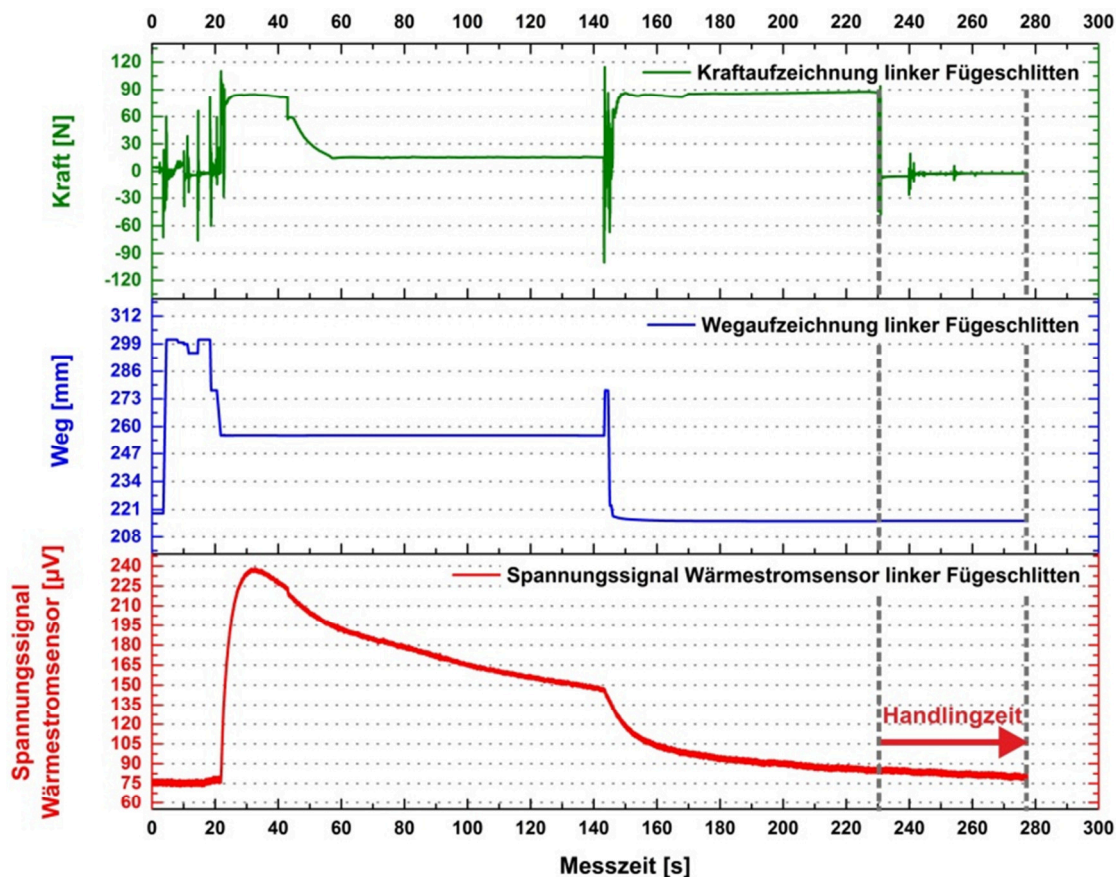
(d.h. der Schnittpunkt und somit das Spannungssignal zum Zeitpunkt des Umstellens befindet sich bei 109,92μV)

#### 7.1.6. Fügephase

Die Fügephase setzt sich, ähnlich wie die Angleichphase, aus der eigentlichen Fügephase und der Bewegungsphase vor dem Fügen zusammen. Die Bewegungsphase vor Fügen kann anhand der Kraft- und Wegaufzeichnung detektiert werden. Das Spannungssignal des Wärmestromsensors zeigt vergleichbar zur Umstellphase einen Abfall des Spannungssignals. In der Fügephase kann keine direkte Wärmestrombilanzierung über den eingebauten Sensor realisiert werden, da dieser sich nicht in direktem Kontakt zu den Fügepartnern befindet. Allerdings kann der Sensor in dieser Zeit dennoch zielführend für eine Qualitätssicherung genutzt werden. Für eine konstante Schweißnahtqualität ist entscheidend, dass der Wärmeeintrag in das Polymer reproduzierbar bleibt. Über den Schweißzyklus hinaus kann mit Hilfe des Wärmestromsensors eine Aussage darüber getroffen werden, ob eine neue Schweißung gestartet werden kann oder nicht. Diesbezüglich ist bislang keine Stellungnahme in Richtlinien oder anderen Regelwerken zu finden. Bekannt ist jedoch, dass Nahtqualitäten, die im Labormaßstab erzeugt wurden, nicht immer mit denen in der Praxis

## 7. Ergebnisse und Diskussion

übereinstimmen. Ein möglicher Grund hierfür könnte die Übertragbarkeit der Versuchsbedingungen vom Labor in die Praxis sein (vgl. Abbildung 57).



Material	Polyethylen
Probekörperabmaße [mm]	10 x 50
Heizelementtemperatur [°C]	200
Angleichzeit [s]	Siehe Grafik
Angleichdruck [MPa]	0,10
Anwärmzeit [s]	100
Umstellzeit [s]	< 5
Fügezeit [s]	80
Fügedruck [MPa]	0,10
Sensor	ITI-Company

**Abbildung 57: Darstellung der Kraft, des Weges und des Spannungssignals des Wärmestromsensors über die Messzeit für den kompletten Schweißzyklus inklusive Umstell-, Füge- und Handlingzeit**

In Abbildung 57 ist die Aufzeichnung des Spannungssignals des Wärmestromsensors weitergeführt bis über die Umstell-, Füge- und Handlingzeit hinaus. Zu erkennen ist, dass das Startniveau des Spannungssignals selbst nach einer Umstell-, Füge- und Handlingzeit von insgesamt 130s noch nicht den

Level von vor der Schweißung, also vor Angleichen, erreicht hat. Ein möglicher Grund hierfür könnte die Trägheit des Gesamtsystems Heizelement sein. Denn bedingt durch die Wärmeabfuhr infolge der Plastifizierung des Kunststoffes zu Beginn der Schweißung, wird die Regelung des Heizelementes versuchen, dies zu kompensieren und produziert mehr Wärme. Diese Wärme liegt in der Umstell- und Fügezeit als Überschuss vor und muss erst wieder abgebaut werden. Folglich beginnt die folgende Schweißung je nach Geschwindigkeit der Produktion mit einer erhöhten Heizelementtemperatur in der Fügefläche. Im Labormaßstab werden deutlich längere Kühl und Handlingzeiten eingehalten, weil hier oftmals händisch und wenig automatisiert gearbeitet wird. Im industriellen Maßstab werden möglichst kurze Zykluszeiten auch über reduzierte Fügephasen realisiert und somit kann dieses hier gezeigte Phänomen greifen.

### 7.1.7. Zwischenfazit Inline-Wärmestrombilanzierung

Die Ergebnisse, die im Abschnitt 6.5.3 dargestellt sind, bilden die Grundlage für eine erfolgreiche, zielorientierte und zuverlässige Inline-Qualitätssicherungsmaßnahme auf Basis der Wärmestrombilanzierung. Es konnte verdeutlicht werden, dass sowohl die aktuelle Sensortechnologie als auch der aktuelle Versuchsaufbau, sprich die Integration des Sensors in den Fügeprozess, sich soweit bewährt hat, dass von einer zuverlässigen und reproduzierbaren Wärmestrombilanzierung gesprochen werden kann. Die in diesem Abschnitt gezeigte Bilanzierung kann bis auf die Fügephase sehr zufriedenstellend nahezu alle Prozessphasen des Heizelementstumpfschweißens abbilden und erweitert bereits bei der Betrachtung der grundlegenden Schweißabfolgen deutlich die Aussagekraft von bisher zum Einsatz kommenden Kraft- und Wegsensoren. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass nicht nur prozessrelevante Einflussgrößen sondern auch materialspezifische bzw. bauteilspezifische Kennwerte mit in die Betrachtung integriert sind (z.B. Schweißen verschiedener Materialien, verschiedene Probekörperflächen, etc.). Neben den klassischen Prozessschritten wie dem Angleichen, dem Anwärmen, dem Umstellen und dem Fügen, wurden zwei weitere relevante Prozessschritte eingeführt. Die Einrichtungphase und die Bewegungsphase vor Angleichen stellen bislang nicht berücksichtigte Prozessphasen dar, erweitern aber die Bilanzierung sehr sinnvoll und bringen zusätzliche prozessrelevante Erkenntnisse.

Neben der reinen Detektion der Prozessschritte wurde auf Basis der Wärmestrombilanzierung bereits eine Abstraktions- als auch Approximationsmöglichkeit der einzelnen Prozessphasen vorgestellt. Die Abstraktion zeigt den Kurvenverlauf idealisiert dargestellt, während die mathematische Approximation den idealisierten Verlauf der Wärmestromkurve bzw. des Spannungsverlaufs des Wärmestromsensors mathematisch beschreibt. Sowohl die Abstraktion als auch die Approximation bilden die Grundlage einer automatisierten Inline-Qualitätssicherungsmaßnahme auf Basis der Wärmestrombilanzierung. Je nach Prozessstabilität können nun die jeweiligen idealisierten Prozessphasen mittels mathematischer Beschreibungen einer Rechnerarchitektur übergeben und mit praxistauglichen Toleranzen versehen werden. Die Überwachung dieser Prozessphasen stellt die eigentliche Inline-Qualitätssicherung dar und kann beliebig automatisiert werden.

Wichtig sei an dieser Stelle zu erwähnen, dass alle Untersuchungen an nicht kalibrierten Sensoren durchgeführt wurden und somit die grundsätzlichen Spannungswerte der Sensoren diese Aussagen zuverlässig generierten. Der Abschnitt 7.1 zeigt, dass die Inline-Wärmestrombilanzierung hervorragend dafür geeignet ist, als Inline-Qualitätssicherungsmaßnahme für das Heizelementstumpfschweißen von polymeren Werkstoffen zu fungieren.

### 7.2. Korrelation Wärmestrombilanzierung und Nahtqualität

Nachdem im Abschnitt 7.1 dargestellt werden konnte, dass die Wärmestrombilanzierung prädestiniert ist für eine Inline-Qualitätssicherung beim Heizelementstumpfschweißen, ist der nächste Schritt, den Zusammenhang zwischen Wärmestrombilanzierung und Nahtqualität zu untersuchen. Dieser Zusammenhang würde die Grundlage für eine aktive Regelung zur Ausschussminimierung beim Heizelementstumpfschweißen darstellen. Denn nur die Kenntnis dieses Zusammenhangs kann eine aktive Regelung auf Basis der Inline-Qualitätssicherung auf beispielsweise eine konstante Nahtqualität ermöglichen und somit den Ausschuss des Prozesses deutlich minimieren und dem Prozess zu einer möglichst hohen Effizienz verhelfen.

Im Nachfolgenden sind die theoretisch erarbeiteten Ansätze dargestellt, auf deren Grundlage sich eine Korrelation zwischen Wärmestrombilanzierung

und Nahtqualität stützt. Weiterhin wurde anhand systematischer Untersuchungen die Tauglichkeit dieser Ansätze überprüft.

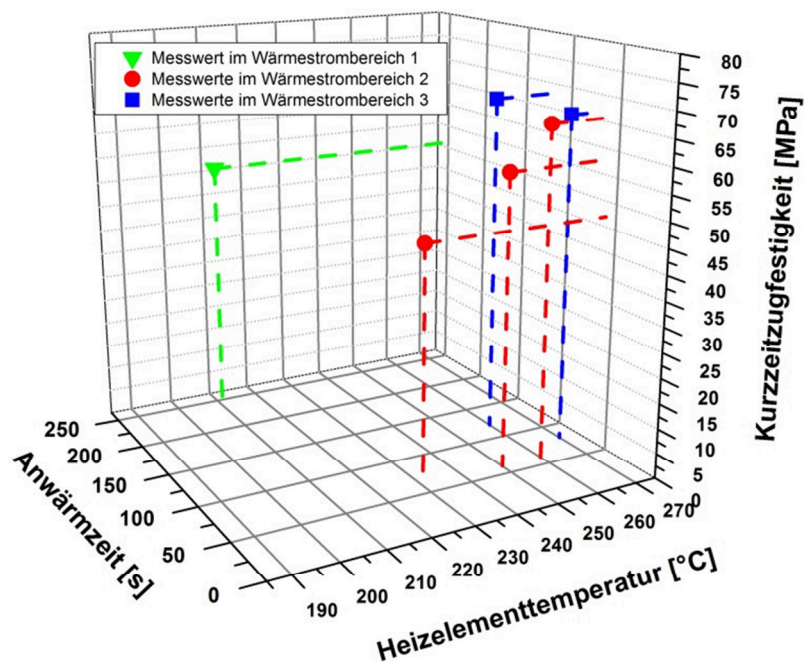
### 7.2.1. Ansätze zur Korrelation zwischen Wärmestrombilanzierung und Nahtqualität ohne Wärmestromsensoren

Die Ansätze zur Korrelation zwischen Wärmestrombilanzierung und Nahtqualität basieren auf der Analyse bisheriger Untersuchungen abseits der Wärmestrombilanzierung. Abbildung 58 zeigt die Ergebnisse für Schweißungen an Rohren aus Polyamid 12, die im Rahmen einer klassischen Schweißbarkeitsuntersuchung durchgeführt wurden. Diese Ergebnisse wurden aufbereitet und entsprechend der Wärmestrombilanzierung interpretiert.

Ersichtlich ist, dass im Grunde zwei verschiedene Ansätze verfolgt wurden, zufriedenstellende Schweißparameter zu finden. Der eine Ansatz versuchte eine Plastifizierung über geringe Heizelementtemperaturen in Kombination mit langen Anwärmzeiten zu realisieren, während der andere Ansatz hohe Heizelementtemperaturen und geringe bzw. moderate Anwärmzeiten nutzt. Die geringen Temperaturen beugen einer thermischen Schädigung vor, die langen Anwärmzeiten werden dann aber notwendig, um genügend Material zu plastifizieren. Bei hohen Temperaturen ist es zwangsläufig so, dass das Material nur geringen Anwärmzeiten standhält und sich der Prozess entsprechend verkürzen muss. Der Bereich, in dem in erster Linie die Heizelementtemperatur erhöht wird, soll Erkenntnisse über die thermische Stabilität liefern.

Werden diese Ergebnisse hinsichtlich einer Wärmestrombilanzierung gedeutet, ist folgendes zu erkennen. Es gibt einen Bereich (Messwert im Wärmestrombereich 1, Symbol ▼) bei niedriger Heizelementtemperatur, bei der die Nahtqualität trotz einer langen Anwärmzeit bzw. eines langen Energieeintrages moderat ist. Im zweiten Bereich (Messwerte im Wärmestrombereich 2, Symbol ●) ist zu erkennen, dass mit zunehmender Temperatur auch die Nahtqualität steigt. Im dritten Bereich (Messwerte im Wärmestrombereich 3, Symbol ■) ist ein Stagnieren der Festigkeit zu erkennen.

## 7. Ergebnisse und Diskussion



Material	Polyamid
Probekörperabmaße [mm]	Rohr Ø63mm Wandstärke 6,3mm
Heizelementtemperatur [°C]	Siehe Grafik
Angleichzeit [s]	0
Angleichdruck [MPa]	0,40
Anwärmzeit [s]	Siehe Grafik
Umstellzeit [s]	< 5
Fügezeit [s]	600
Fügedruck [MPa]	0,40

**Abbildung 58: Darstellung der Kurzzeit-Zugfestigkeit über die Anwärmzeit und die Heizelementtemperatur für verschiedene Schweißparameter**

Obwohl es sich sicherlich nicht um eine vollständige Schweißbarkeitsuntersuchung handelt, kann anhand dieser Versuche die Grundidee für den zu dieser Zeit bereits erarbeiteten Lösungsansatz, zur Korrelation der Nahtqualität mit dem Wärmestromsignal, erläutert werden.

Der Grundgedanke der Wärmestrombilanzierung ist, nicht mehr rein die Heizelementtemperatur und die Anwärmzeit zu betrachten, wie dies bislang der Fall bei klassischen Untersuchungen war, sondern den Wärmestrom. Die Theorie zur Wärmestrombilanzierung aus Abschnitt 3.1 zeigt, dass die Heizelementtemperatur mit der thermischen Energie und die Anwärmzeit mit der

Wirkdauer korrelieren. Die Wärmemenge pro Zeiteinheit ist dann der Wärmestrom. Unter der Annahme, dass die thermische Energie  $E_{Th}$  der Wärmemenge gleichzusetzen ist, ist die Wärmemenge  $Q$  direkt proportional zur spezifischen Wärmekapazität  $c_p$ , zur Masse  $m$  und zur Temperatur  $T$  des Füge- teils. Unter der weiteren Annahme, dass im betrachteten Temperaturbereich von 190°C bis 270°C sich die spezifische Wärmekapazität von hier PA12 nicht nennenswert ändert, steigt  $E_{Th}$  mit zunehmender Heizelementtemperatur an. Dies bedeutet (vgl. Gleichung 60):

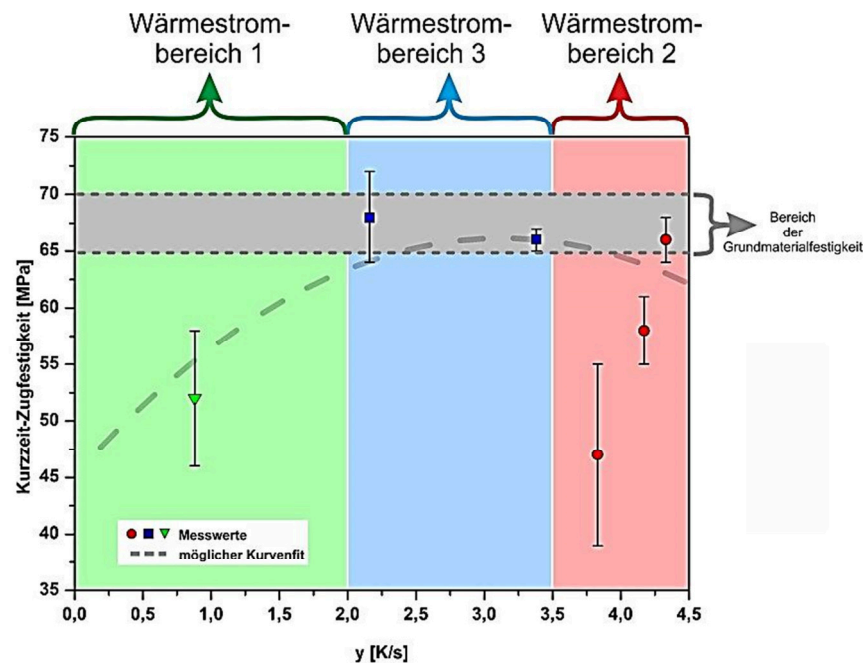
$$E_{Th} = c_p \cdot m \cdot T = Q \text{ mit } c_{p_{190^\circ C - 270^\circ C}} = \text{konstant und } m = \text{konstant}$$

**Gleichung 60**

Abbildung 59 zeigt somit eine mögliche Auswertung des Diagramms aus Abbildung 58 gemäß dem Zusammenhang in Gleichung 61:

$$\dot{Q} = \frac{\delta Q}{\delta t} = \frac{\delta E_{Th}}{\delta t} = \frac{\Delta T}{\Delta t} \cdot c_{p_{\text{konstant}}} \cdot m_{\text{konstant}} \quad \text{bzw.} \quad y = \frac{\dot{Q}}{c_{p_{\text{konstant}}} \cdot m_{\text{konstant}}} = \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

**Gleichung 61**



**Abbildung 59: Darstellung der Ergebnisse aus Abbildung 16 in der Form Wärmestrom über Kurzzeitzugfestigkeit**



## 7. Ergebnisse und Diskussion

---

In Abbildung 59 sind die Ergebnisse aus Abbildung 58 äquivalent in drei Bereiche eingeteilt. Der Bereich 1 (Messwert Wärmestrombereich 1, Symbol ▼) ist dadurch gekennzeichnet, dass ein geringer Wärmestrom anliegt und somit nur ein geringes bzw. mittleres Festigkeitsniveau erreicht werden kann. Das Material wird hier auf Grund der extrem langen Zykluszeit zwar erwärmt, erreicht allerdings nicht die für eine gute Schweißung notwendige Konditionierung oder ist bereits auf Grund zu langer Zykluszeiten thermisch geschädigt.

Der Bereich 2 (Messwerte im Wärmestrombereich 2, Symbol ●) zeichnet sich dadurch aus, dass eine Wärmestromerhöhung zwar direkt zu einer Festigkeitssteigerung führt, allerdings nur eine der drei Schweißungen eine Nahtfestigkeit im Bereich der Grundmaterialfestigkeit besitzt. Dies könnte darauf hindeuten, dass der Energieeintrag für dieses Material möglicherweise zu hoch ist und somit zu starken Festigkeitsschwankungen führt.

Im Bereich 3 (Messwerte im Wärmestrombereich 3, Symbol ■) stagniert die Festigkeit bzw. steigt nur noch sehr langsam. In diesem Bereich sind die Randbedingungen so gewählt, dass eine optimale Verbindung entstehen kann. Die Konditionierung mit einem  $\dot{\gamma}$  zwischen 2,0 K/s bis 3,5 K/s ergibt für dieses Material eine gleichbleibende hohe Festigkeit der Nahtverbindung.

Da es sich in diesem Abschnitt um die grundlegenden Überlegungen auf Basis konventioneller Schweißbarkeitsuntersuchungen handelt, wurden im nachfolgenden systematische Untersuchungen, mit definierten Materialien und speziell auf diese Thematik abgestimmten Schweißparametern, durchgeführt.

### 7.2.2. Korrelation Wärmestrombilanzierung und Nahtqualität

Wie der Ansatz zur Korrelation zwischen Wärmestrombilanzierung und Nahtqualität aus Abschnitt 7.2.1 zeigt, ist die Auswertung entscheidend für die Interpretation der Ergebnisse. Es hat sich gezeigt, dass sich eine dreidimensionale Auftragung der Messwerte anbietet. So kann direkt die Wärmestrominformation mit der Heizelementtemperatur und der Nahtqualität verknüpft werden. Neben der Wärmestrominformation wurde die Heizelementtemperatur als zweites Auftragskriterium herangezogen, weil diese während des Prozesses nicht dynamisch angepasst bzw. verändert werden kann und dennoch einen entscheidenden Einfluss auf die Nahtqualität besitzt.



Die Auswertung und Aufbereitung der Messdaten erfolgte mit Hilfe des Programms OriginPro 9.0 der Fa. OriginLab Corporation, Northampton, USA. Die Tabelle 5 zeigt exemplarisch einen aufbereiteten Datensatz für Polyethylen.

**Tabelle 5: Grundlegender Datensatz zur Erstellung eines 3D-Oberflächenplots**

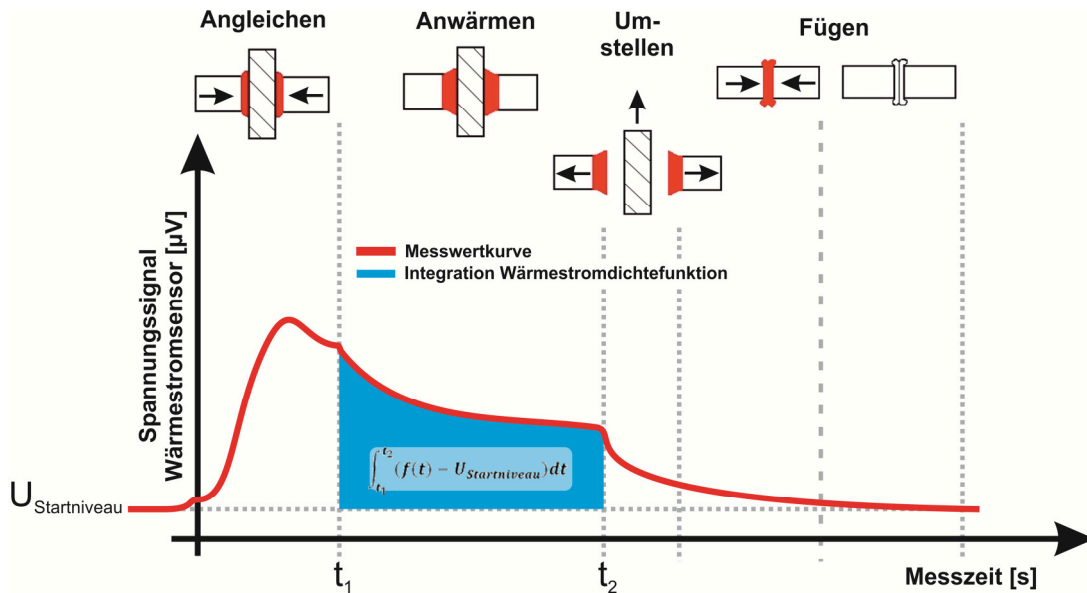
	A(X)	B(Y)	C(Z)	D(Z)
Langname	Heizelementtemperatur	Wärmestromdichteinformation q <sub>3D</sub>	Qualitätskriterium Schweißfaktor	STABW Qualitätskriterium
Einheiten	[°C]	[μV/(K*mm²)]	[-]	
Kommentare				
1	180	0,000	0,000	0,000
2	180	0,051	0,065	0,009
3	180	0,043	0,872	0,113
4	180	0,038	1,005	0,005
5	180	0,031	1,006	0,002
6	180	0,027	1,005	0,003
7	180	0,024	1,004	0,004
8	220	0,000	0,709	0,202
9	220	0,053	1,004	0,003
10	220	0,047	1,006	0,002
11	220	0,039	1,007	0,002
12	220	0,032	1,004	0,006
13	220	0,027	0,999	0,002
14	220	0,024	0,998	0,006
15	250	0,000	1,000	0,004
16	250	0,059	1,002	0,001
17	250	0,050	1,003	0,001
18	250	0,043	1,003	0,004
19	250	0,035	1,008	0,005
20	250	0,030	1,005	0,006
21	250	0,026	1,001	0,005
22	280	0,000	0,997	0,006
23	280	0,055	1,004	0,003
24	280	0,048	0,999	0,004
25	280	0,040	1,003	0,001
26	280	0,034	0,995	0,005
27	280	0,029	1,000	0,006
28	280	0,026	1,003	0,005

Zu erkennen ist (in Tabelle 5), dass auf der X-Achse die Heizelementtemperatur, auf der Y-Achse die Wärmestromdichteinformation  $\dot{q}_{3D}$ , auf der Z-Achse das Qualitätskriterium, hier der Schweißfaktor, und auf einer weiteren Z-Achse die ermittelte Standardabweichung des Qualitätskriteriums angetragen ist. Weiterhin ist zu erkennen, dass eine Variation der Heizelementtemperatur zu unterschiedlichen Wärmestromdichteinformationen  $\dot{q}_{3D}$  und Schweißfaktoren geführt hat.

Da sowohl unterschiedliche Schweißfaktoren als auch unterschiedliche Materialien miteinander verglichen werden sollten und eine allgemeingültige Aussa-

## 7. Ergebnisse und Diskussion

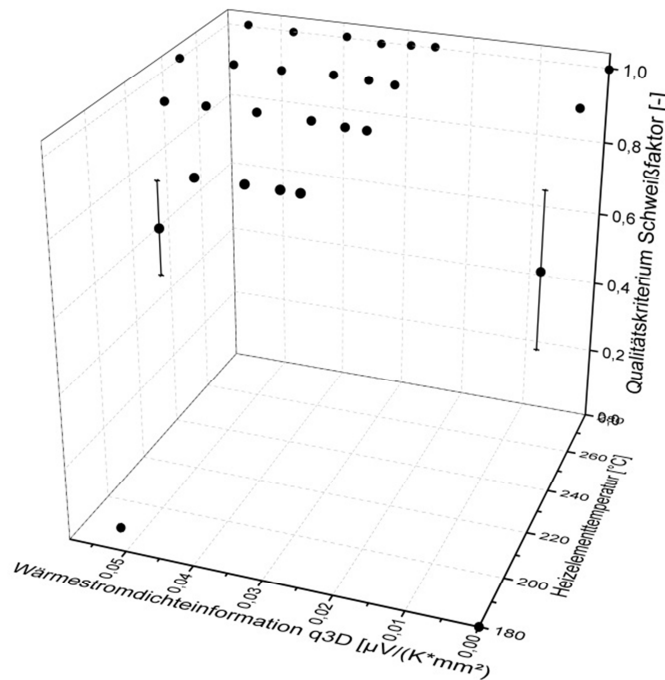
ge angestrebt ist, handelt es sich bei der Wärmestromdichteinformation  $\dot{q}_{3D}$  nicht nur um den reinen Spannungswert der Thermosäule sondern um einen Kennwert, der zeit-, temperatur- und fugeflächenkorrigiert ist. Der Kennwert Wärmestromdichteinformation  $\dot{q}_{3D}$  setzt sich wie folgt zusammen: es wurden Schweißungen mit entsprechenden Schweißparametern und dazu eine parallele Aufzeichnung des Spannungssignals mittels Wärmestromsensor durchgeführt. Die Spannungsaufzeichnung wurde im Bereich der Anwärmzeit integriert und der erhaltene Wert durch die Heizelementtemperatur, die Anwärmzeit und die Fugefläche dividiert (vgl. Abbildung 60).



$$q_{3D} = \dot{q}_{3D} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (f(t) - U_{Startniveau}) dt}{T_{Heizelement} \cdot t_{Anwaerm} \cdot A_{Fuegeflaeche}} \quad [\mu V / (K \cdot mm^2)]$$

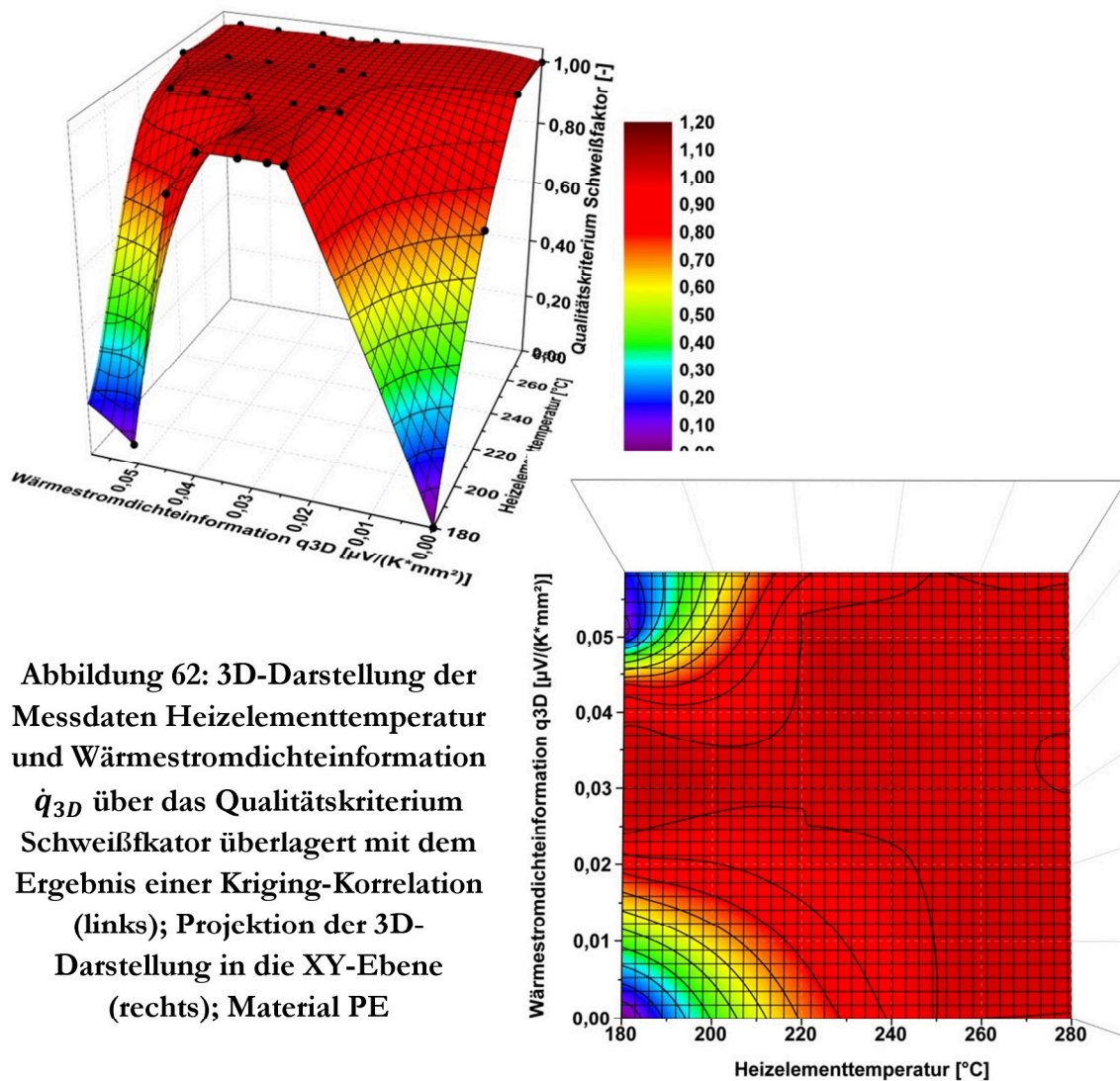
Abbildung 60: Darstellung der formalen Zusammensetzung von  $\dot{q}_{3D}$

Abbildung 61 zeigt das Ergebnis einer 3D-Darstellung der so erhaltenen Ergebnisse entsprechend der Tabelle 5 für Polyethylen.



**Abbildung 61: 3D-Darstellung der Messdaten  
Heizelementtemperatur und Wärmestromdichteinformation  $\dot{q}_{3D}$   
über das Qualitätskriterium Schweißfaktor für PE**

Bei genauer Betrachtung ist zu erkennen, dass sich ab etwa 200°C ein deutliches Festigkeitsplateau bei PE ausbildet. Da dies aber nur sehr schwer zu erfassen ist und die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Messwerten nur schwer vorzustellen sind, wurde zusätzlich zu den Messwerten ein 3D-Oberflächendiagramm generiert. Abbildung 62 zeigt das Ergebnis einer 3D-Darstellung der Messdaten aus Tabelle 5 mit dem im Abschnitt 6.7 vorgestellt Kriging. Es wurde für eine bessere Darstellung eine Interpolation der Daten auf 500 Spalten und 500 Zeilen durchgeführt. Zur besseren Interpretation der Messdaten und zur Überprüfung, ob das Gridding zufriedenstellend funktioniert hat, sind zusätzlich zur farbigen 3D-Oberfläche in der linken Abbildung die eigentlichen realen Messwerte aus Tabelle 5, der Plot aus Abbildung 61, überlagert dargestellt. Weiterhin zeigt die Abbildung 62 eine Projektion der Farbabbildung in die XY-Ebene im rechten Teil der Abbildung. Die 3D-Darstellung in Kombination mit einer 2D-Farbabbildung wurde als beste Möglichkeit angesehen, die Wärmestrombilanzierung durchzuführen und die relativ komplexen Zusammenhänge visuell zu verdeutlichen.



In Abbildung 62 ist zu erkennen, dass die 3D-Darstellung sowie die Projektion die Messwerte zufriedenstellend ablaufen. Die Farbskala zeigt den erreichten Schweißfaktor der entsprechenden Diagrammfarbe zugeordnet an. Diese Art der Darstellung soll im Weiteren verwendet werden, um die Korrelation zwischen Heizelementtemperatur, Wärmestromdichteinformation  $\dot{q}_{3D}$  und einem bewusst gewählten Qualitätskriterium näher zu erläutern.

### 7.2.3. Ergebnisse der Korrelationsuntersuchungen

#### Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS):

Die Untersuchungen mit ABS hinsichtlich der maximal erreichbaren Festigkeit (vgl. Abbildung 63) zeigen, dass bei ABS zunächst zwischen 200°C und 220°C nur ein relativ enger Bereich der Wärmestromdichteinformation  $\dot{q}_{3D}$  zu einem hohen Schweißfaktor nahe 1,0 führt. In diesem engen Bereich ist auffällig, dass eine deutlich ausgeprägte Standardabweichung vorherrscht. Ab 220°C verbreitert sich der Wärmestromdichteinformationsbereich deutlich, der zu hohen Schweißfaktoren führt, und auch die Standardabweichung der Messwerte nimmt spürbar ab. ABS kann somit zuverlässig ab etwa 220°C geschweißt werden unter Nutzung einer Wärmestromdichteinformation  $\dot{q}_{3D}$  zwischen 0,1  $\mu\text{V}/(\text{K}\cdot\text{mm}^2)$  und 0,04  $\mu\text{V}/(\text{K}\cdot\text{mm}^2)$ .

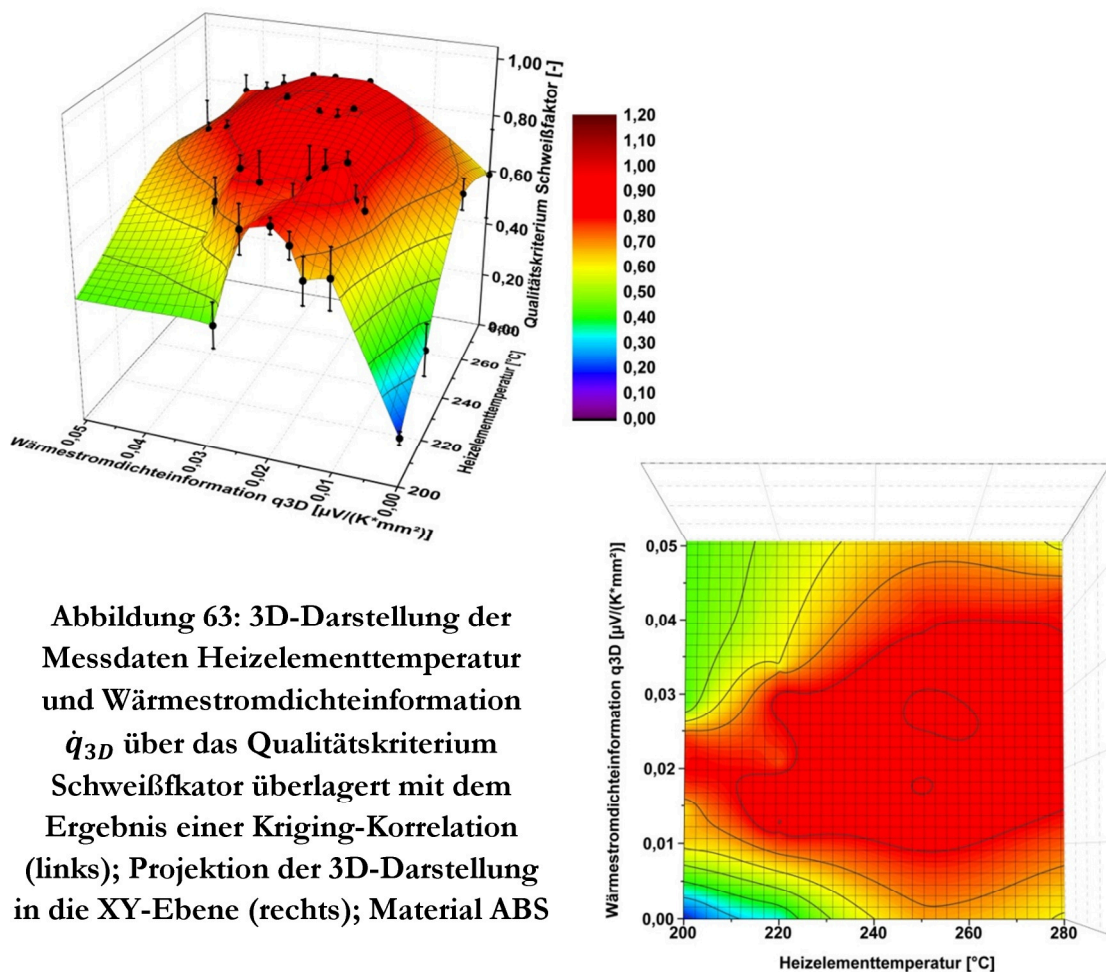


Abbildung 63: 3D-Darstellung der Messdaten Heizelementtemperatur und Wärmestromdichteinformation  $\dot{q}_{3D}$  über das Qualitätskriterium Schweißfaktor überlagert mit dem Ergebnis einer Kriging-Korrelation (links); Projektion der 3D-Darstellung in die XY-Ebene (rechts); Material ABS



### Polycarbonat (PC):

Abbildung 64 zeigt die Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen von PC. Ab etwa 260°C und einer Wärmestromdichteinformation  $\dot{q}_{3D}$  von über 0,01  $\mu\text{V}/(\text{K}\cdot\text{mm}^2)$  kann PC zuverlässig mit einem Schweißfaktor von über 0,6 geschweißt werden. Höhere Schweißfaktoren bis nahezu 1,0 sind ab etwa 275°C und einer Wärmestromdichteinformation  $\dot{q}_{3D}$  von 0,015  $\mu\text{V}/(\text{K}\cdot\text{mm}^2)$  und 0,03  $\mu\text{V}/(\text{K}\cdot\text{mm}^2)$  zu erreichen.

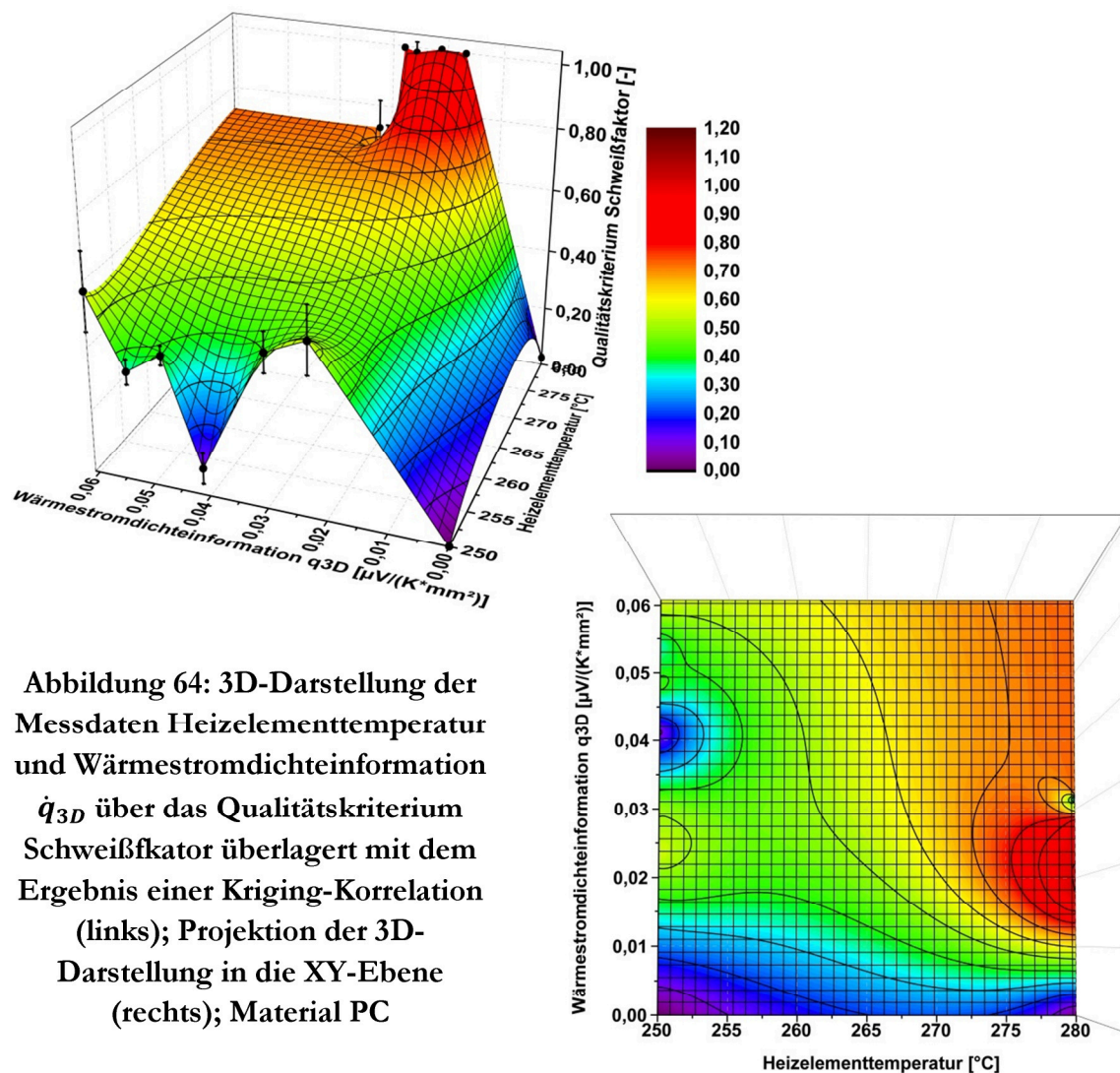


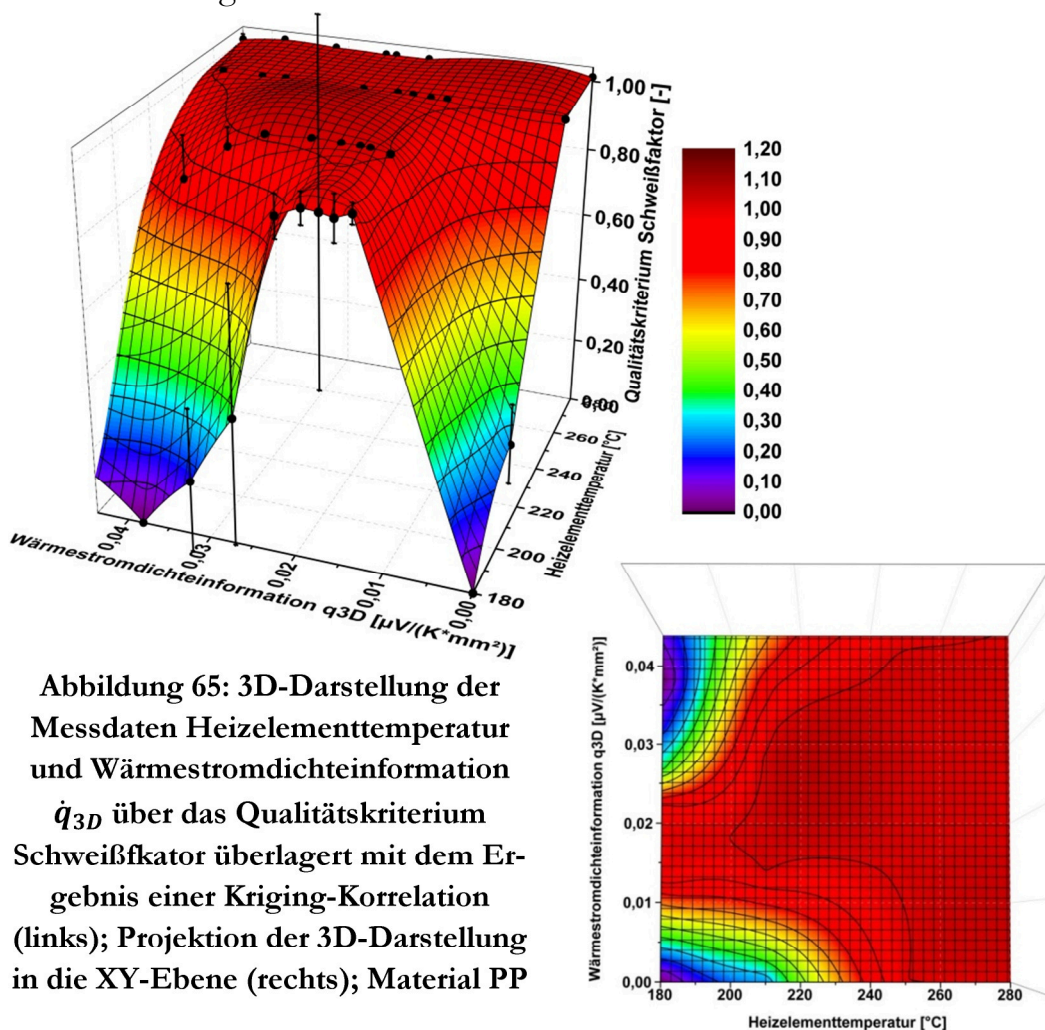
Abbildung 64: 3D-Darstellung der Messdaten Heizelementtemperatur und Wärmestromdichteinformation  $\dot{q}_{3D}$  über das Qualitätskriterium Schweißfaktor überlagert mit dem Ergebnis einer Kriging-Korrelation (links); Projektion der 3D-Darstellung in die XY-Ebene (rechts); Material PC

**Polyethylen (PE):**

Die Korrelationsuntersuchungen für Polyethylen sind bereits in Abbildung 62 für den Schweißfaktor als Qualitätskriterium dargestellt. Zu erkennen ist, wie bereits erwähnt, ein ausgeprägtes Festigkeitsplateau. Das Festigkeitsplateau beginnt bereits bei 180°C und einer Wärmestrom-dichteinformation  $\dot{q}_{3D}$  zwischen 0,02  $\mu\text{V}/(\text{K}\cdot\text{mm}^2)$  und 0,04  $\mu\text{V}/(\text{K}\cdot\text{mm}^2)$ . Ab 220°C ist das Plateau bereits über die komplette Bandbreite der Wärmestromdichteinformation  $\dot{q}_{3D}$ , 0,00  $\mu\text{V}/(\text{K}\cdot\text{mm}^2)$  bis 0,06  $\mu\text{V}/(\text{K}\cdot\text{mm}^2)$ , ausgeprägt.

**Polypropylen (PP):**

Das Material PP hat ähnlich wie PE ein ausgeprägtes Festigkeitsplateau ab etwa 200°C über den kompletten Wärmestromdichteinformationsbereich  $\dot{q}_{3D}$  von 0  $\mu\text{V}/(\text{K}\cdot\text{mm}^2)$  bis 0,04  $\mu\text{V}/(\text{K}\cdot\text{mm}^2)$  (vgl. Abbildung 65). Ebenso ist festzustellen, dass mit zunehmender Temperatur die Standardabweichung deutlich verringert ist.



### Polystyrol (PS):

zeigt die Auswertung der Festigkeitsuntersuchungen für PS. Zu erkennen ist, dass Polystyrol zwischen 220°C und 280°C mit einer Wärmestromdichteinformation  $\dot{q}_{3D}$  zwischen 0  $\mu\text{V}/(\text{K}\cdot\text{mm}^2)$  und 0,05  $\mu\text{V}/(\text{K}\cdot\text{mm}^2)$  zu durchgehend hohen Festigkeiten nahe einem Schweißfaktor von 1,0 führt.

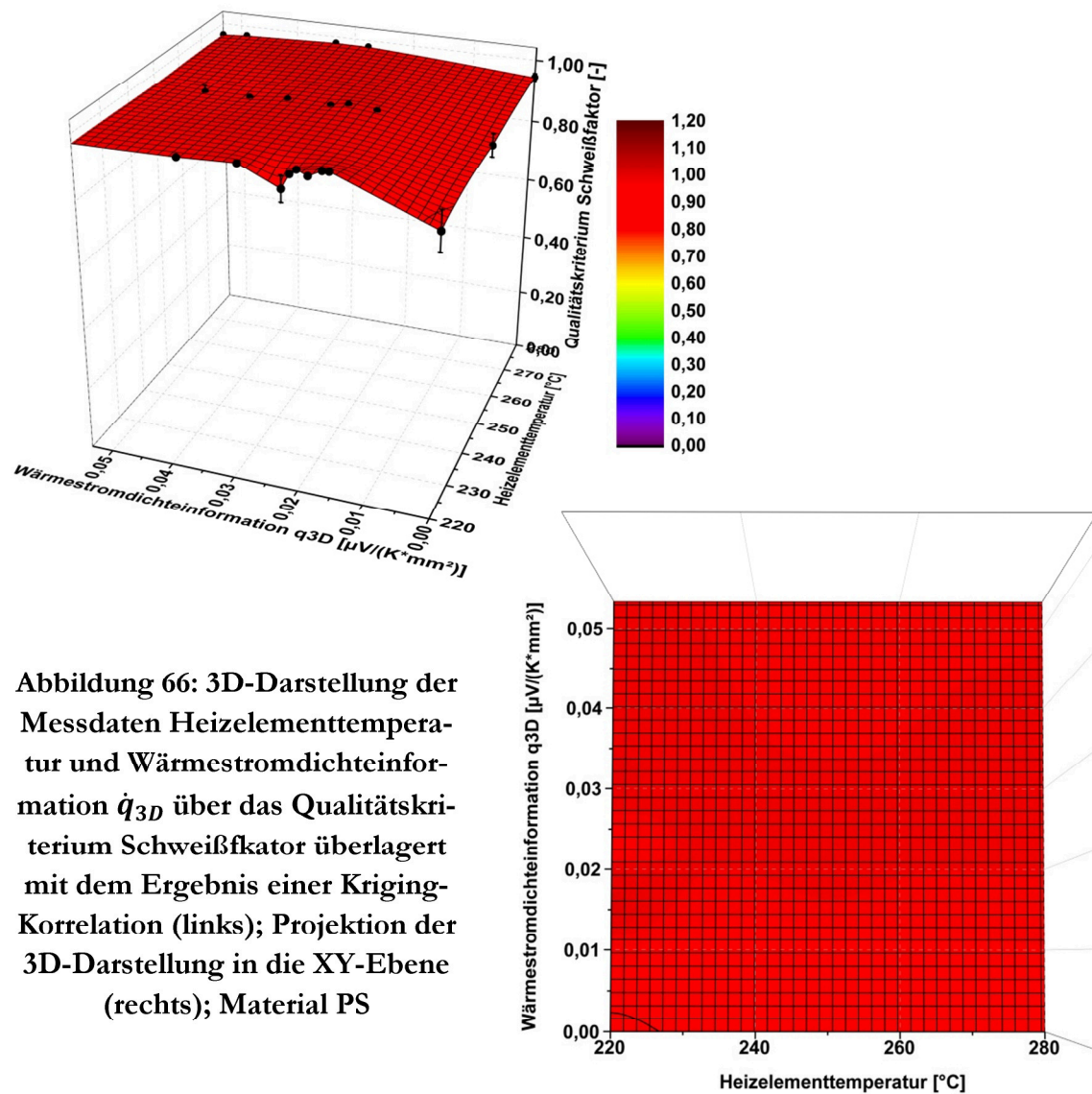
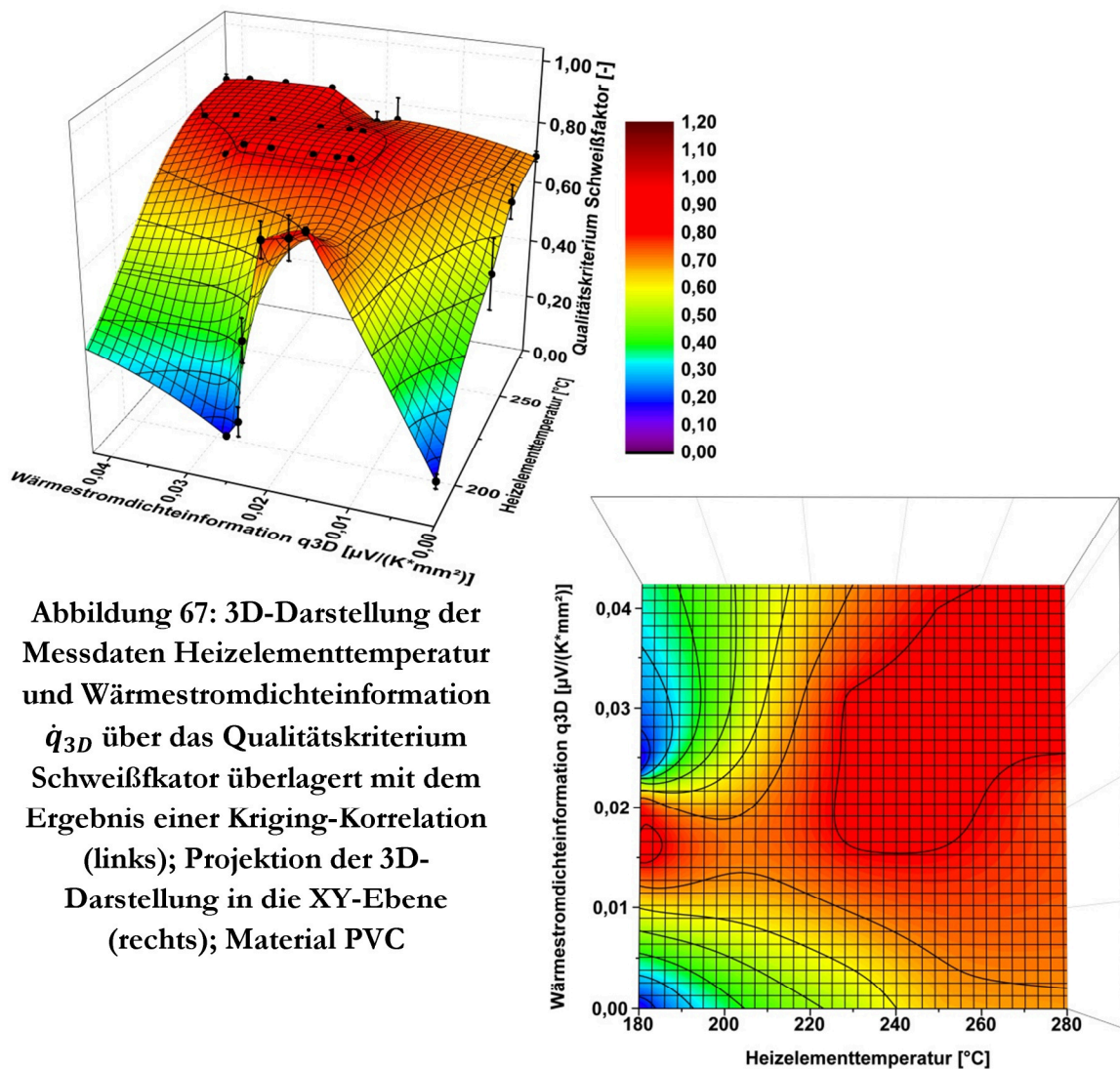


Abbildung 66: 3D-Darstellung der Messdaten Heizelementtemperatur und Wärmestromdichteinformation  $\dot{q}_{3D}$  über das Qualitätskriterium Schweißfaktor überlagert mit dem Ergebnis einer Kriging-Korrelation (links); Projektion der 3D-Darstellung in die XY-Ebene (rechts); Material PS



### Polyvinylchlorid (PVC):

Die Schweißnahtfestigkeit von PVC ist ab einer Heizelementtemperatur von 220°C und einer Wärmestromdichteinformation  $\dot{q}_{3D}$  von 0,01  $\mu\text{V}/(\text{K}\cdot\text{mm}^2)$  bis 0,04  $\mu\text{V}/(\text{K}\cdot\text{mm}^2)$  relativ konstant auf einem hohen Niveau nahe 0,8 (vgl. Abbildung 67). Die Standardabweichung ist in diesem Bereich sehr gering.



### 7.2.4. Zwischenfazit Korrelation Wärmestromdichtebilanzierung und Nahtqualität

Die Korrelation der Wärmestrombilanzierung mit der Nahtqualität erfolgt anhand der Darstellung der Wärmestromdichteinformation  $\dot{q}_{3D}$  über die Heizelementtemperatur und dem Qualitätskriterium Schweißfaktor. Das Generieren der so genannten Wärmestromdichteinformation  $\dot{q}_{3D}$  stellt eine aussagekräftige Korrelationsgrundlage dar, welche die Wärmestrombilanzierung mit der Nahtqualität praxisrelevant verknüpft. Die Nutzung dieser Art der Darstellung einschließlich der Bildung der Wärmestromdichteinformation  $\dot{q}_{3D}$  ermöglicht es, eine Schweißbarkeitsuntersuchung so auszuwerten, dass sofort die Prozessgrenzen erkannt werden und eine Parameterauswahl erfolgen kann. Sinnvoll ist es, sowohl möglichst hohe Temperaturen bei gleichzeitig möglichst hoher Wärmestromdichteinformation  $\dot{q}_{3D}$  zu nutzen, um den Prozess möglichst effizient ablaufen zu lassen. Weiterhin ist dank der Wärmestrombilanzierung geregelt, dass genau dieser gewonnene Wert der Wärmestromdichteinformation  $\dot{q}_{3D}$  im Prozess fortlaufend überwacht und auf diesen gezielt geregelt und als Qualitätssicherungsmaßnahme genutzt werden kann. Zusätzlich kann im Falle von Prozessschwankungen (beispielsweise Schwankung der Heizelementtemperatur) relativ einfach anhand der dreidimensionalen Darstellung vorhergesagt werden, ob das aktuelle Bauteil noch in einem Bereich gefertigt wurde, welcher eine ausreichende Festigkeit aufweist oder nicht.

Es konnte sogar für alle hier untersuchten Polymere ein einheitlicher Datensatz generiert werden, der unabhängig vom Polymer eine zufriedenstellende Nahtqualität zur Folge hat (siehe Abbildung 68 und Abbildung 69). Sobald bei einer Heizelementtemperatur von 270°C eine Wärmestromdichteinformation  $\dot{q}_{3D}$  von 0,22  $\mu\text{V}/(\text{K}\cdot\text{mm}^2)$  generiert wurde, kann von einem zufriedenstellenden Schweißfaktor ausgegangen werden. Weiterhin konnte ein Prozessfenster (siehe graue Säule in Abbildung 68 und Abbildung 69) generiert werden, welches besonders für eine industrielle Umsetzung wichtig ist. Die Säule, die das Prozessfenster kennzeichnet, besitzt einen Durchmesser von etwa 0,005  $\mu\text{V}/(\text{K}\cdot\text{mm}^2)$  bzw. 50°C. Innerhalb dieses exemplarisch festgelegten Bereiches könnten Bauteile gefertigt werden, die mit einer guten Festigkeit verbunden werden.

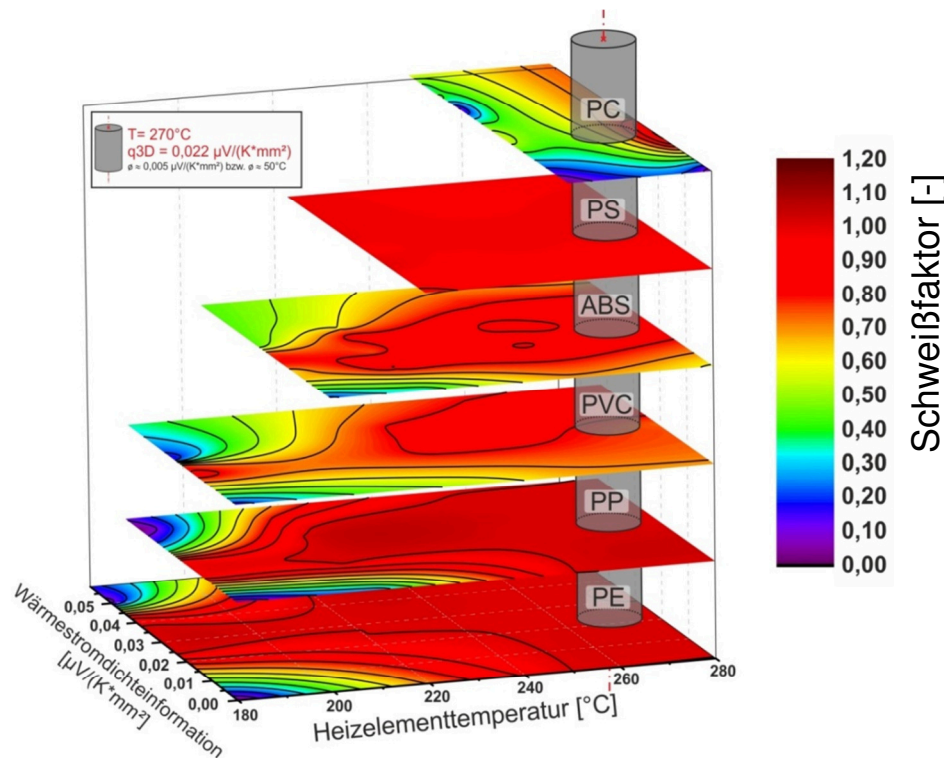


Abbildung 68: Überlagerung der Projektionen der 3D-Darstellungen in XY-Ebene; Heizelementtemperatur und Wärmestromdichteinformation  $\dot{q}_{3D}$  über das Qualitätskriterium Schweißfaktor; Material PC, PS, ABS, PVC, PP, PE

An dieser Stelle soll noch exemplarisch anhand der maximalen Bruchdehnung von geschweißten Bauteilen gezeigt werden, dass die Wärmestromdichtebilanzierung universell zum Einsatz kommen kann und nicht nur zur Optimierung und Überwachung des maximalen Schweißfaktors dient. Abbildung 69 zeigt eine zur Abbildung 68 äquivalente Auswertung mit dem Schwerpunkt maximale Bruchdehnung der geschweißten Bauteile anstelle des Schweißfaktors. Zu erkennen ist, dass zum einen die Art der Darstellung sich bewährt hat, schnell und zuverlässig die relevanten Bruchdehnungsbereiche für verschiedene Materialien zu erkennen und zum anderen auch hier ein Parametersatz ausgewählt werden kann, der bei allen Materialien zu zufriedenstellenden Bruchdehnungen führt. Dass es sich hierbei um dasselbe Prozessfenster handelt wie bei der Auswertung bzgl. des Schweißfaktors ist nicht verwunderlich, da ein maximaler Schweißfaktor eine hohe Verbundfestigkeit voraussetzt. Die Verbundfestigkeit korreliert in diesem Fall sehr gut mit der Bruchdehnung.

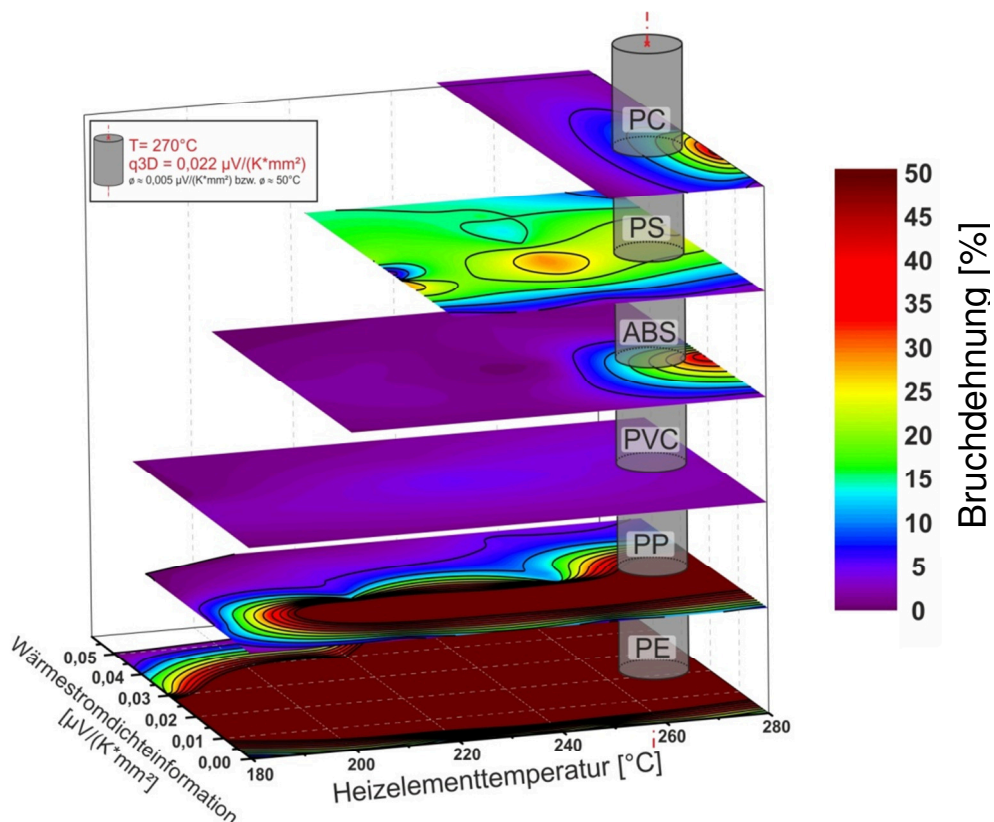
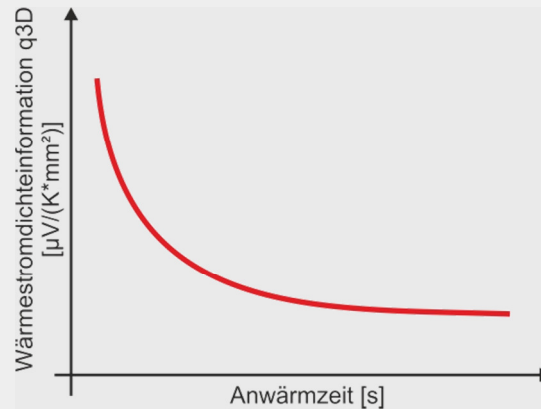


Abbildung 69: Überlagerung der Projektionen der 3D-Darstellungen in XY-Ebene; Heizelementtemperatur und Wärmestromdichteinformation  $\dot{q}_{3D}$  über das Qualitätskriterium Bruchdehnung; Material PC, PS, ABS, PVC, PP, PE

Um im Vorfeld einer Schweißung eine Abschätzung vornehmen zu können, in welchem Bereich die Anwärmzeit für das entsprechende Material liegt um bei 270°C eine definierte Wärmestromdichteinformation  $\dot{q}_{3D}$  zu erhalten, gibt die Abbildung 70 eine Möglichkeit der Abschätzung. Hierzu wurde eine temperaturunabhängige Funktion erarbeitet, die mit ausreichender Genauigkeit eine Abschätzung der Anwärmzeit liefert.



**Abbildung 70: Möglichkeit zur Abschätzung der Anwärmzeit bei gegebener Wärmestromdichteinformation  $\dot{q}_{3D}$  für verschiedene Polymere**

Zielgröße:

Schweißfaktor 1 (bei Heizelementtemperatur 270°C)

Asymptotischer Verlauf dimensionslos gerechnet:

$$y = a - b \cdot c^x$$

Gleichung 62

$$x = \frac{\log\left(\frac{a-y}{b}\right)}{\log(c)}$$

Gleichung 63

mit

$$a_{ABS} = 0,0138, b_{ABS} = -0,0195, c_{ABS} = 0,9892$$

$$a_{PE} = 0,0212, b_{PE} = -0,0350, c_{PE} = 0,9817$$

$$a_{PP} = 0,0141, b_{PP} = -0,0276, c_{PP} = 0,9821$$

$$a_{PS} = 0,0163, b_{PS} = -0,0365, c_{PS} = 0,9716$$

$$a_{PVC} = 0,0125, b_{PVC} = -0,0242, c_{PVC} = 0,9868$$

$$a_{PC} = 0,0065, b_{PC} = -0,0378, c_{ABS} = 0,9927$$

Beispielsweise kann für ABS bei einer ausgewählten Wärmestromdichteinformation  $\dot{q}_{3D}$  von 0,022  $\mu\text{V}/(\text{K} \cdot \text{mm}^2)$  unabhängig der Heizelementtemperatur von einer Anwärmzeit von etwa 80s ausgegangen werden. Unabhängig des hier verwendeten Werkstoffes kann somit die Anwärmzeit abgeschätzt werden und ohne Kenntnis der exakten materialcharakteristischen Kennwerte ein Parameter gewählt werden, bei dem eine zufriedenstellende Schweißnahtqualität realisiert werden kann. Den asymptotischen Verlauf und somit die Kenngrö-

Ben a, b und c liefert bei einem vollkommen unbekannten Material die erste Schweißung.

### 7.3. Besonderheiten der Wärmestrombilanzierung

In diesem Abschnitt werden Besonderheiten der Wärmestrombilanzierung näher beleuchtet und aufgezeigt, welche weiteren Potentiale in der Wärmestrombilanzierung über hochempfindliche und hochtemperaturbeständige Wärmestromsensoren existieren.

#### 7.3.1. Kalibration von Wärmestromsensoren für Heizelementstumpfschweißanwendungen

Die Abschnitte 7.1 und 7.2 zeigen, dass trotz einer fehlenden Kalibration der eingesetzten Sensoren die Wärmestrombilanzierung ein sehr aussagekräftiges Tool ist, einem Heizelementstumpfschweißprozess zu einer permanenten Qualitätskontrolle zu verhelfen und das Verfahren zu überwachen. Die Gründe hierfür sind in vorherigen Kapiteln im Detail erläutert.

Wichtig für eine Wärmestrombilanzierung sind nicht der Absolutwert des Wärmestroms, sondern die thermodynamischen Verhältnisse. Abbildung 71 zeigt das Prinzip einer möglichen Auswertung, welches bereits im Abschnitt 7.2 (Korrelation Wärmestrombilanzierung und Nahtqualität) sehr erfolgreich angewandt werden konnte. Zum einen kann immer eine Basislinie gezogen werden, die als Bezugsgröße herangezogen werden kann. Diese Basislinie enthält sowohl bauteilspezifische- als auch prozess-, sensorspezifische und konstruktionsspezifische Eigenschaften und beschreibt den Grundzustand des Kollektivs (Wärmestromsensor auf einem Heizelement mit Antihafbeschichtung vor dem Heizelementstumpfschweißprozess) ausreichend. Zum anderen bietet es sich immer an, eine Referenzkurve aufzuzeichnen und entsprechende Abweichungen von dieser zu begutachten. Die Hintergründe zur Entstehung eventueller Abweichungen sind im Abschnitt 7.1 erläutert worden und besitzen auch ohne Kalibration des Spannungssignals des Wärmestromsensors ihre volle Gültigkeit.



An dieser Stelle sei noch erwähnt, dass die Grundlage der Prozessüberwachung über die Bestimmung der Angleichzeiten, Anwärmzeiten usw. sich auch spezifischer Messzeiten bedient. Denn es wird nicht die absolute Messzeit herangezogen, sondern die Messzeit bezogen auf den Startzeitpunkt der Schweißung.

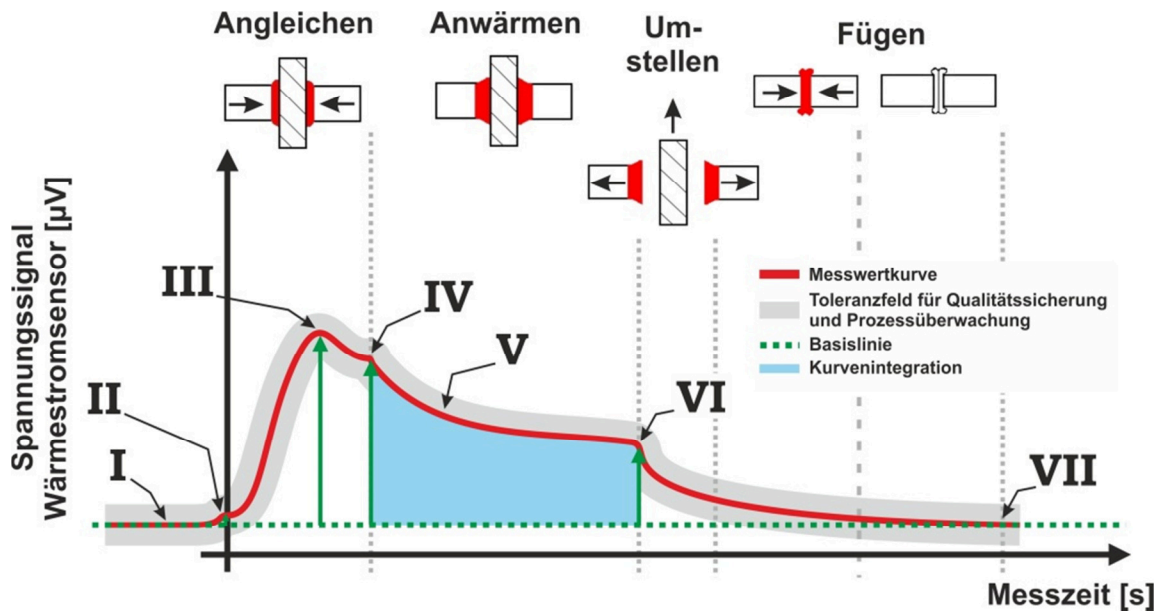


Abbildung 71: Darstellung alternativer Auswertung auf Basis spezifischer Kennwerte sowie eines Toleranzfeldes ohne Kalibration des Wärmestromdichteverlaufs

In einzelnen Fällen ist es sogar nicht sinnvoll, eine umfassende Kalibration aller Einflussgrößen vorzunehmen. Denn eine Kalibration bezüglich der Schweißposition würde beispielsweise bedeuten, dass unabhängig von der Position auf dem Sensor, vergleichbare Probengrößen zu vergleichbaren Wärmestromsignalen führen würden. Dies würde verhindern, dass Positionierproblematiken, wie im Abschnitt 7.4.1 (Positioniergenauigkeit der Probekörper auf dem Sensor) dargestellt, nicht mehr zu detektieren wären. Die Kalibration würde es verhindern, solche Besonderheiten mit dem Wärmestromsensor sichtbar machen zu können und die Aussagekraft der Qualitätssicherung mindern.

### 7.3.2. Modellierung des Schweißprozesses anhand der Wärmestrombilanzierung

Die Modellierung und Simulation des Schweißprozesses mittels COMSOL Multiphysics (Version 4.3a) hat zum Ziel, die Einflüsse der Wärmestrombilanzierung noch besser interpretieren und verstehen zu können. Einerseits soll untersucht werden, welche Einflüsse vor allem die Wärmestrahlung und die Wärmeleitung auf die Plastifizierung haben und zum anderen soll so eine Art Bewertung der „Plastifizierleistung“ vorgenommen werden. Unter „Plastifizierleistung“ wird in diesem Zusammenhang verstanden, wie viel Material durch die Art der Energieeinbringung plastifiziert werden kann. Von besonderem Interesse ist, ob direkt über Wärmeleitung und unter Einbeziehung der Wärmestrahlung ebenso viel Material plastifiziert werden kann, als wäre der vom Sensor gemessene Wert des Wärmestroms in der Simulation als Energiequelle zur Plastifizierung vorgegeben. Die Untersuchungen, ob die Plastifizierleistung über Wärmeleitung und Wärmestrahlung identisch mit der Plastifizierleistung mittels Wärmestromeintrag sind und wie nahe beide Werte an die Realität herankommen, stellen die Basis für ein fundiertes Prozessverständnis dar. Auch kann diese Art der Betrachtung ein erster Schritt auf dem Weg zu einer Kalibrierungsgrundlage für Wärmestromsensoren für den Heizelementstumpfschweißprozess darstellen.

Der Versuchsaufbau zur Simulation von Wärmeleitungs- und Strahlungseinflüssen während der Anwärmzeit kann dem Abschnitt 6.8 entnommen werden.

#### 7.3.2.1. Relevante Erkenntnisse der Simulation von Wärmeleitung und Wärmestrahlung während der Anwärmphase eines Heizelementstumpfschweißprozesses

Wie bereits erwähnt, wurde die Simulation soweit optimiert, bis die rechnerbasierten Ergebnisse mit denen der Realität möglichst gut übereinstimmten. Es wurde festgestellt, dass es drei zentrale Einflussfaktoren auf die Richtigkeit der Simulation gibt. Von großer Bedeutung ist die Genauigkeit der temperaturabhängigen Materialkennwerte, der realitätsgetreue Geometrieabgleich Simulation und Realität sowie die Berücksichtigung des gesamten Schweißprozesses, obwohl letztendlich nur die Anwärmphase simuliert wurde.



Abbildung 72 zeigt die Ergebnisse des Vergleichs real bestimmter Schmelzschichtdicken mit der simulierter Schmelzschichtdicken unter Berücksichtigung relevanter Einflussfaktoren während der Anwärmszeit beim Heizelementstumpfschweißen von PE bei einer Heizelementtemperatur von 220°C. Hierzu wurde auf der Abszisse die real in der Schweißmaschine ermittelte Schmelzschichtdicke und auf der Ordinate die rechnerisch mittels COMSOL berechnete Schmelzschichtdicke aufgetragen. Der ideale Kurvenverlauf zeigt den Fall, dass die Berechnung der realen Schmelzschichtdicke zu 100% entspricht. Je größer die Abweichungen der Messwerte vom idealen Kurvenverlauf sind, desto stärker weichen die berechneten Dicken von den realen Schichtdicken ab.

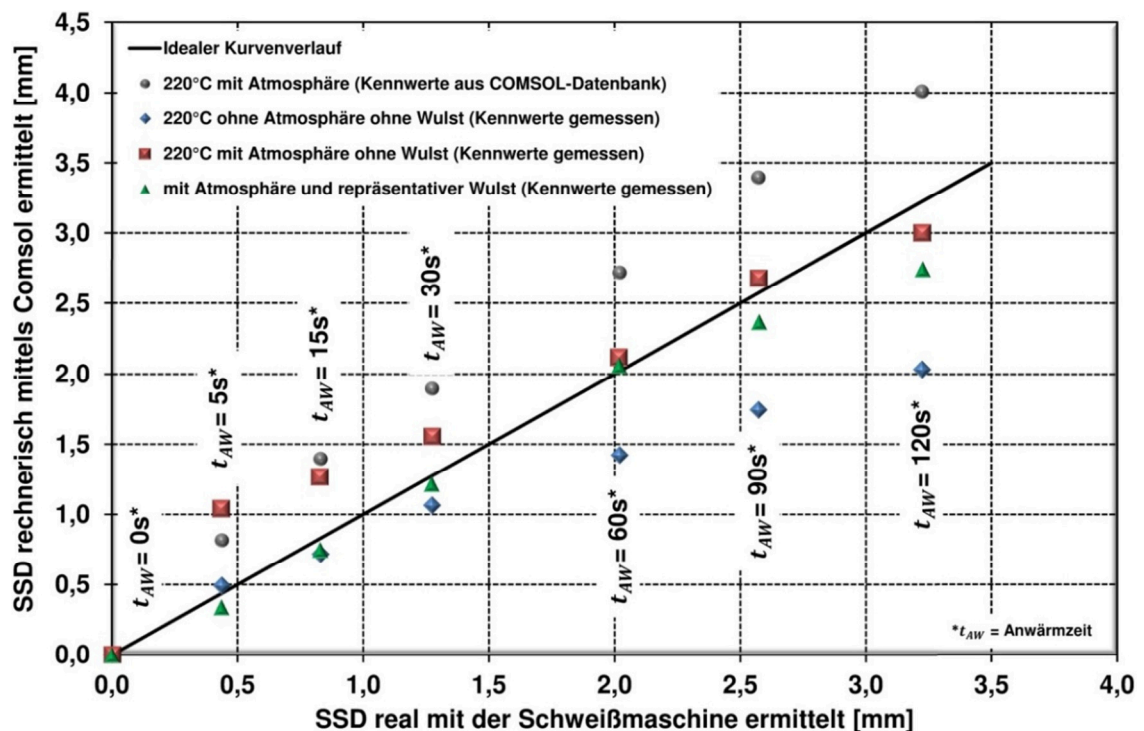


Abbildung 72: Ergebnisse des Vergleichs real bestimmter Schmelzschichtdicken (SSD) mit der simulierter Schmelzschichtdicken unter Berücksichtigung relevanter Einflussfaktoren während der Anwärmszeit beim Heizelementstumpfschweißen von Polyethylen; Heizelementtemperatur 220°C

Ein zentraler Einflussfaktor auf die Qualität der Simulationsergebnisse ist die Auflösung und Genauigkeit der Materialkennwerte. Wie Abbildung 72 (siehe Abbildung 72, Symbol ●) zeigt, korreliert, wie erwartet, die Qualität der Simulationsergebnisse direkt mit der Qualität der mittels thermischer Analyse er-

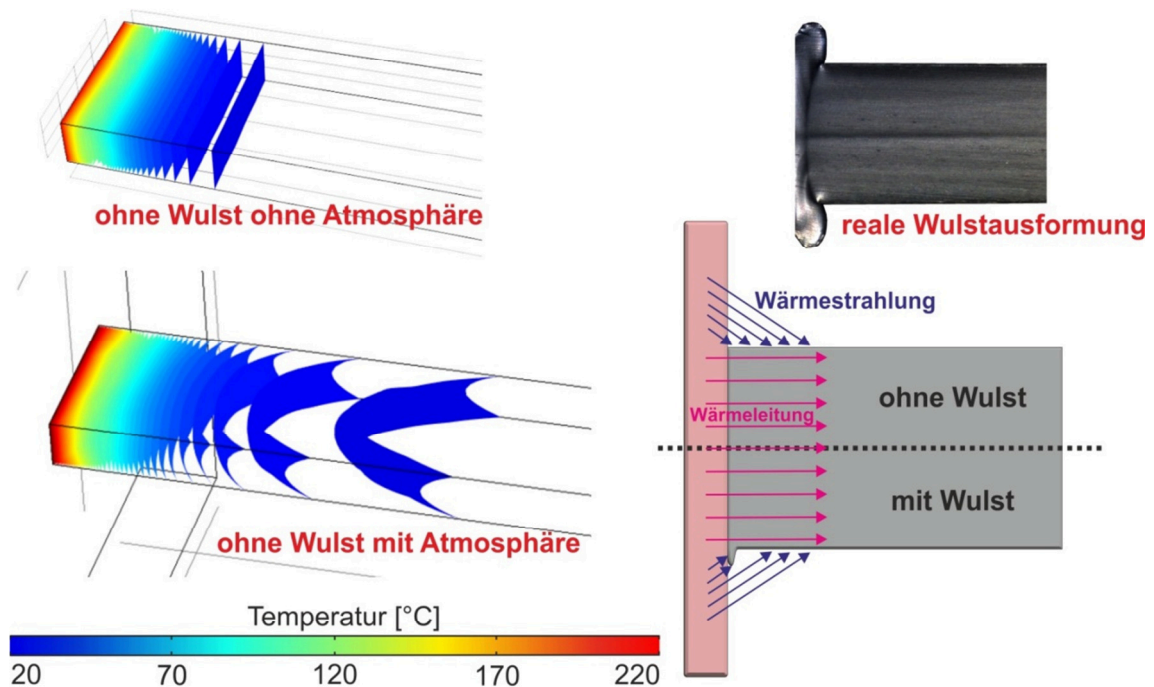
## 7. Ergebnisse und Diskussion

---

mittelten Materialkennwerte. Die in COMSOL vorhandenen Materialkennwerte aus der Datenbank beinhalteten zwar diverse Standardkennwerte, unter anderem auch für PE, allerdings reichte die Genauigkeit dieser Kennwerte (vor allem Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität) nicht aus, um eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen der Simulation und der Realität für verschiedene Anwärmzeiten zu erhalten. Mit zunehmenden Anwärmzeiten weichen die simulierten Kennwerte, bei denen die Daten aus der Datenbank herangezogen wurden, immer stärker von den real gemessenen ab. Der Grund hierfür ist, dass zum einen die Kennwerte aus der Datenbank nicht über den vollen Schweißtemperaturbereich temperaturabhängig vorliegen und zum anderen Rezepturunterschiede bei Polymeren die individuelle Bestimmung der Materialkennwerte verlangen.

Weiterhin wurde festgestellt, dass der Simulationsaufbau (siehe Abbildung 72, Symbol ◆ und ■) von entscheidender Bedeutung ist. Wie die Ergebnisse der theoretischen Wärmestrombilanzierung eines konventionellen Heizelementaufbaus aus Abschnitt 7.4.6 unter Berücksichtigung einer PTFE-Beschichtung bereits gezeigt haben, ist nicht nur der Einfluss der Wärmeleitung vom Heizelement in den Kunststoff von zentraler Bedeutung, sondern auch die Wärmestrahlung. Vor allem konnte mittels COMSOL sehr gut der Einfluss der Wärmestrahlung entkoppelt von der Wärmeleitung sichtbar gemacht werden. Die Abbildung 72 zeigt, dass in den ersten 30 - 40 Sekunden der Anwärmphase die Übereinstimmung der simulierten Schmelzschichtdicke mit der real gemessenen ohne Atmosphäre zum Teil deutlich besser ist. Erst ab einer Anwärmzeit von 40s entsprechen die Ergebnisse mit Atmosphäre deutlich besser den realen Ergebnissen. Abbildung 73 zeigt im linken Bereich den Unterschied einer Berechnung mit und ohne Atmosphäre. Zu erkennen ist, dass die Wärmestrahlung des Heizelements in Richtung Kunststoff dafür verantwortlich ist, dass sich die Isothermen krümmen und somit zu einer größeren Schmelzschichtdicke beitragen. Die Wärmestrahlung führt zu einer direkten Erwärmung der Oberfläche und somit zu einer Materialerwärmung im Randbereich. Vorwiegend Wärmeleitung im Kernbereich und eine zusätzliche Erwärmung der Oberfläche führt zu einer Krümmung der Isothermen. Deshalb liegt die in Abbildung 72 berechnete Schmelzschichtdicke im Mittel mit Atmosphäre generell höher als die Werte ohne Atmosphäre.

Warum allerdings die Werte der berechneten Schmelzschichtdicken mit Atmosphäre bei kurzen Anwärmzeiten über den realen Kennwerten liegen zeigt der rechte Bereich von Abbildung 73. Obwohl die Simulation nur den relevanten Teilabschnitt des Schweißprozesses hinsichtlich der Plastifizierung, sprich die Anwärmphase, betrachtet, beeinflusst die Angleichphase die Plastifizierung dennoch maßgeblich.

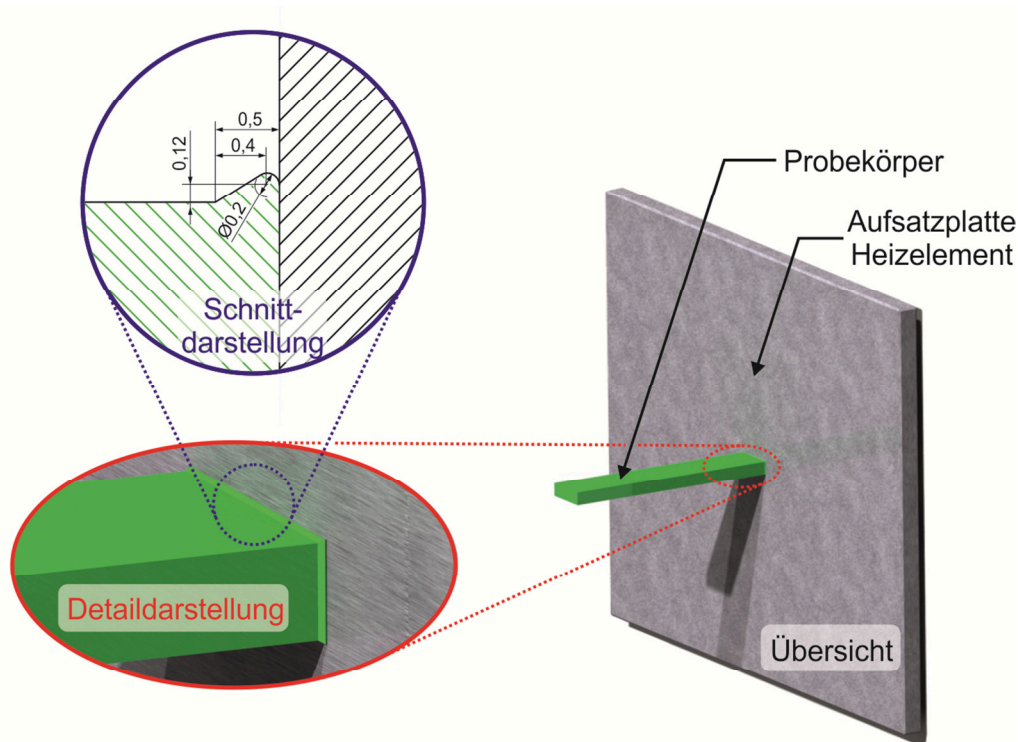


**Abbildung 73: Vergleich einer Simulation mit und ohne Atmosphäre (links; simulierte Anwärmzeit jeweils 120s); grafische Darstellung des Einflusses der Wulstausbildung auf Wirkung der Wärmestrahlung (rechts); reale Wulstausformung (rechts oben)**

Trotz, dass die theoretische Überlegung ebenso, wie oftmals auch die Literatur [Nat92, Kre88, Tap89] davon ausgeht, dass die Angleichphase hinsichtlich der plastifizierten Schichten getrennt entkoppelt von der Anwärmphase betrachtet werden kann, zeigt die Simulation, dass dies eigentlich nicht möglich ist. Es muss laut Simulation die Anwärmphase zumindest soweit berücksichtigt werden, dass die geometrischen Verhältnisse der Wulst mitberücksichtigt werden. D.h., gerade weil davon ausgegangen wird, dass ein ausreichend hoher Angleichdruck die unebenen Bereiche plastifiziert und nahezu vollständig verdrängt, ändert sich dadurch der Einfluss der Wärmestrahlung in der Anwärmphase zum Teil sehr (vgl. Abbildung 73 rechts). Abbildung 74 zeigt die Aus-

## 7. Ergebnisse und Diskussion

formung der Schweißwulst, die in Abbildung 72 zu einer sehr guten Übereinstimmung zwischen den simulierten und den realen Schmelzschichtdicken über einen weiten Bereich der Anwärmzeit geführt hat. Zu erkennen ist, dass bereits ein kleiner Wulst die Wirkung der Wärmestrahlung bei geringen Anwärmzeiten soweit beeinflusst, dass eine Übereinstimmung mit der Realität gegeben ist. Die Wulst stellt in diesem Falle eine Materialanhäufung dar, die verhindert, dass die Wärmestrahlung die Kernbereiche des Probekörpers erwärmt. Folglich ist die Wulst dafür verantwortlich, dass vor allem bei geringen Anwärmzeiten die Wärmeleitung die größte Rolle spielt und deshalb auch die Ergebnisse der Simulation ohne Anwärmzeit und ohne Wulst in Abbildung 72 so gut mit der Realität übereinstimmen.



**Abbildung 74:** Darstellung der für die Berechnung herangezogene ideale Wulstausformung für eine Heizelementstumpfschweißung mit einer Heizelementtemperatur von 220°C bei Polyethylen und einer Anwärmzeit bis 120s

### 7.3.2.2. Nutzung des Wärmestromsignals des Wärmestromsensors als Energieeintrag

Sowohl der Sensor der Fa. ITI Company als auch der Sensor der Fa. Me-soScribe Technologies Inc. wurde mit einem Kalibrationswert geliefert. In beiden Fällen kann davon ausgegangen werden, dass der Kalibrationswert für eine flächige Nutzung des Sensors ermittelt wurde, da dies der normale Einsatzzweck der Sensoren darstellt. D.h., wie bereits in den Abschnitten 3.5 und 6.5.2 angedeutet ist eine Kalibration der Sensoren in aller Regel so ausgeführt, dass der Sensor immer über die gesamte Sensorfläche den Messbedingungen ausgesetzt wird und eine andere Art der Kalibration höchst aufwendig wäre. Dank der sehr guten Übereinstimmung zwischen der Simulation und der realen Bestimmung der Schmelzschichtdicke soll nun versucht werden, den über den Sensor ermittelten Wärmestrom der Kunststoffprobe als Energieeintrag zur Verfügung zu stellen. Hierzu wird der Probekörper separiert und entsprechend der Abbildung 75 der Wärmestrom über die Zeit als Energiequelle vorgegeben.

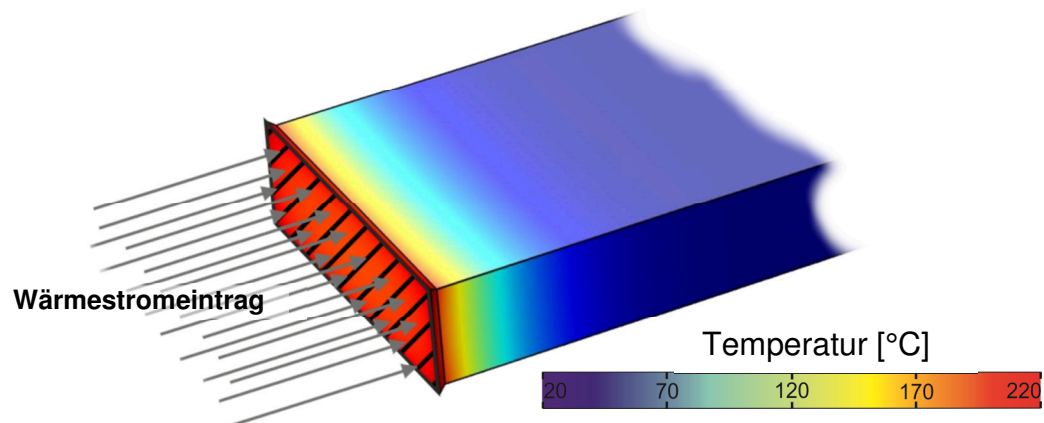


Abbildung 75: Veranschaulichung des Wärmestromeintrags in den Probekörper

Abbildung 76 zeigt die Ergebnisse der Simulation (siehe Abbildung 76, Symbol ■), bei der der vom Sensor aufgezeichnete Wärmestrom dem Probekörper als alleinige Energiequelle zur Plastifizierung zur Verfügung gestellt wurde. Zu erkennen ist, dass die Simulationsergebnisse mit Wulst, ohne Atmosphäre und der vom Hersteller gelieferten Grundkalibration relativ schlecht mit der Realität übereinstimmen. D.h., die Kalibration des Herstellers ist nur mit großer Vorsicht oder nicht für einen Einsatz in einer Schweißmaschine geeignet. Trotz der Kalibration weichen die Ergebnisse sehr stark von der Realität ab. Der einzige Schnittpunkt, der zwischen Simulation und real bestimmter



## 7. Ergebnisse und Diskussion

---

Schmelzschichtdicke existiert, ist in diesem Falle bei einer Anwärmzeit von etwa 30s. Berechnungen mittels Comsol haben gezeigt, dass der Schnittpunkt davon abhängt, mit welcher Wulstgeometrie gerechnet wurde. Je größer die Wulst in der Simulation ist, umso weiter verschiebt sich der Schnittpunkt zu höheren Anwärmzeiten. In der aktuellen Simulation kann nicht berücksichtigt werden, dass in der Anwärmzeit, bedingt durch die thermische Ausdehnung des Materials, sich die Wulst mit zunehmender Anwärmzeit vergrößert.

Für diesen Fall, d.h. einer Sensorabdeckung im Schweißprozess von 20mm x 5mm bei 220°C und einer definierten Probenposition auf dem Heizelement, muss zusätzlich zur Grundkalibration eine Korrekturfunktion geschaffen werden, die die Abweichungen unabhängig von der Erwärmzeit korrigiert. Sowohl die Korrekturfunktion als auch die mit der Korrekturfunktion verrechneten Funktion (siehe Abbildung 76, Symbol ●) ist in Abbildung 76 dargestellt.

Die Korrekturfunktion an sich ist notwendig, Abweichungen zwischen der realen Wulstausformung und der für die Simulation herangezogenen Wulst zu kompensieren. Zur Bestimmung der Korrekturfunktion wurde die Differenz zwischen realem Kurvenverlauf und dem idealen Kurvenverlauf ausgewertet und mathematisch dargestellt. Auch beinhaltet die Korrekturfunktion beispielsweise das Ansprechverhalten des Sensors, Konvektionserscheinungen im Bereich des realen Sensors, wo keine Schmelze anliegt, der Einfluss einer PTFE-Folie zum Schutz des Sensors und Einflüsse durch die Sensoradaption auf dem Heizelement. Über die Korrekturfunktion werden Abweichungen und Wechselwirkungen zwischen realem und simuliertem Aufbau versucht soweit möglich zu kompensieren. So ist eine differenzierte Betrachtung zwischen gewollten und nicht gewollten Einflussfaktoren möglich.

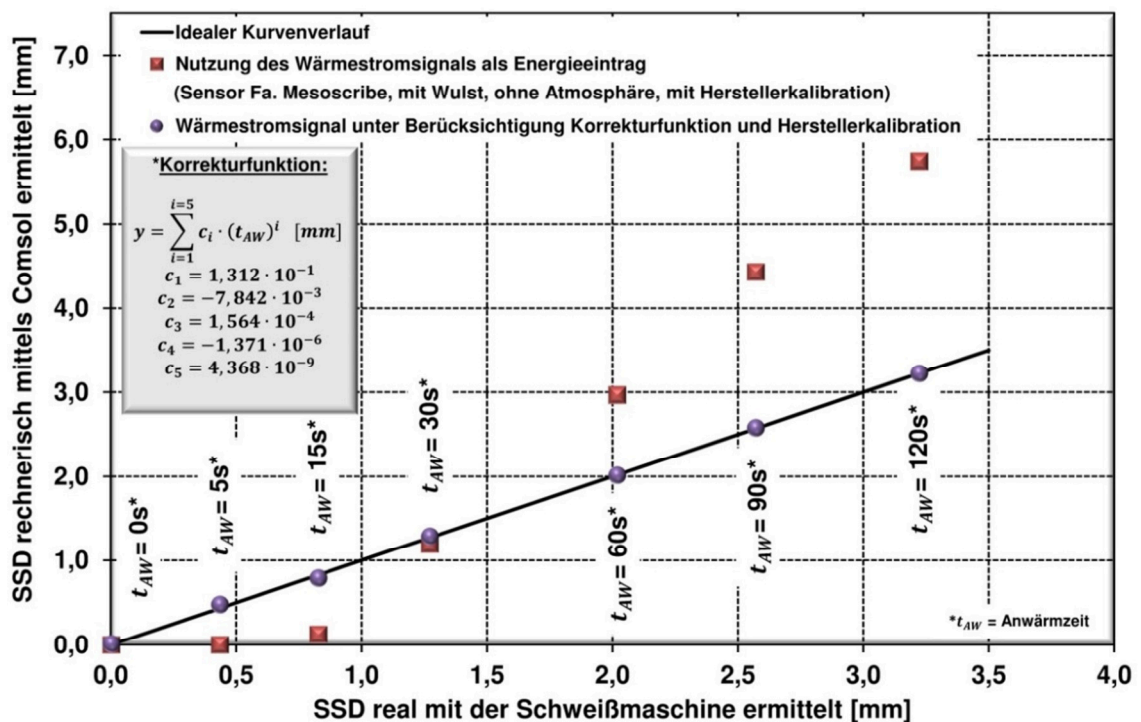


Abbildung 76: Ergebnisse des Vergleichs real bestimmter Schmelzschichtdicken (SSD) mit der simulierter Schmelzschichtdicken unter Nutzung des real gemessenen Wärmestroms mittels Wärmestromsensor als Energiequelle für die Plastifizierung einer Polyethylenprobe

#### 7.4. Weitere fertigungsbezogene Potentiale

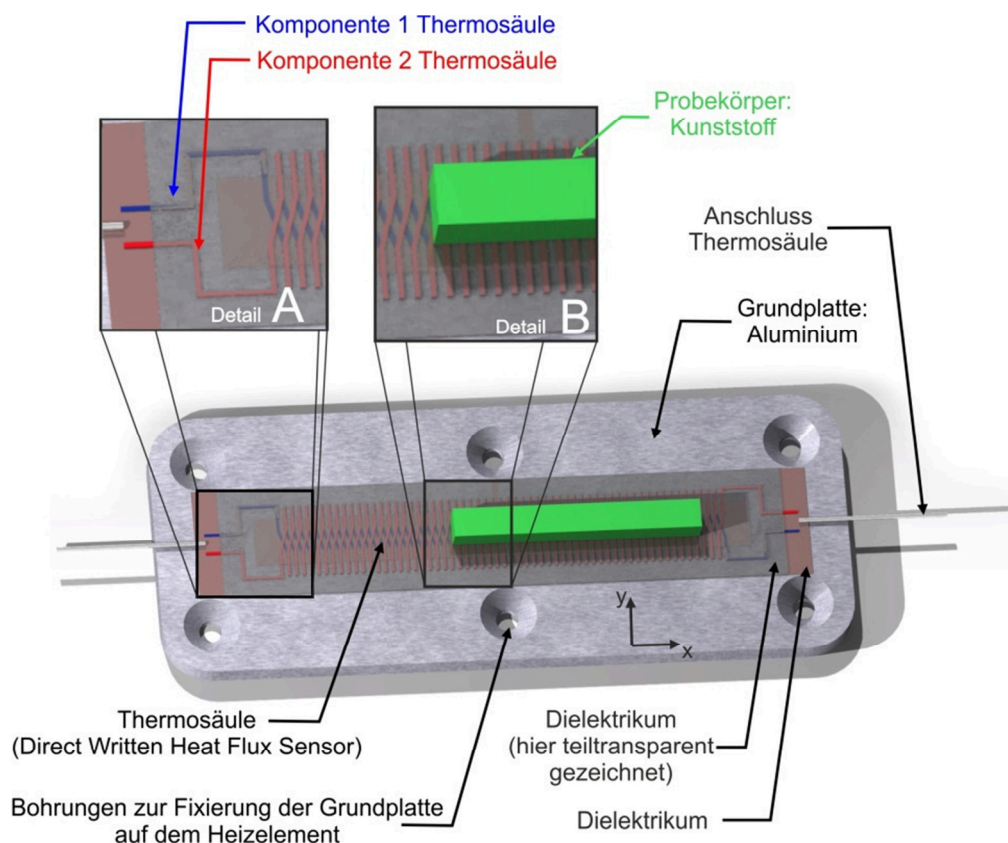
##### 7.4.1. Positioniergenauigkeit der Probekörper auf dem Sensor

Die Positionierung des Kunststoffes auf dem Wärmestromsensor und speziell der Thermosäule korreliert direkt mit dem Spannungssignal der Thermosäule. Abbildung 77 zeigt eine CAD-Zeichnung des Wärmestromsensors der Fa. MesoScribe Technologies Inc. mit speziell kontrastierter Thermosäule in rot und blau sowie teiltransparentem Dielektrikum. Die Detaildarstellung mit der Kennzeichnung A soll erneut den Aufbau der Thermosäule näher verdeutlichen. Die Detaildarstellung B hingegen soll zeigen, dass der Kunststoffprobekörper, abhängig von der Größe der Kunststoffprobe und der Position auf dem Sensor, eine charakteristische Überdeckung der Thermosäule und folglich ein für diesen Kunststoff charakteristisches Spannungssignal verursacht.

## 7. Ergebnisse und Diskussion

Das Spannungssignal der Thermosäule ist von folgenden zwei wesentlichen Faktoren beeinflusst:

- absolute Position der Kunststoffprobe auf dem Sensor
- Anzahl der von der Kunststoffprobe überdeckten Thermosäulenabschnitte, was gleichbedeutend mit der Anzahl der überdeckten Knotenpunkte bzw. dem Verhältnis Knotenpunkte mit Kunststoffkontakt zu Knotenpunkte ohne Kunststoffkontakt ist

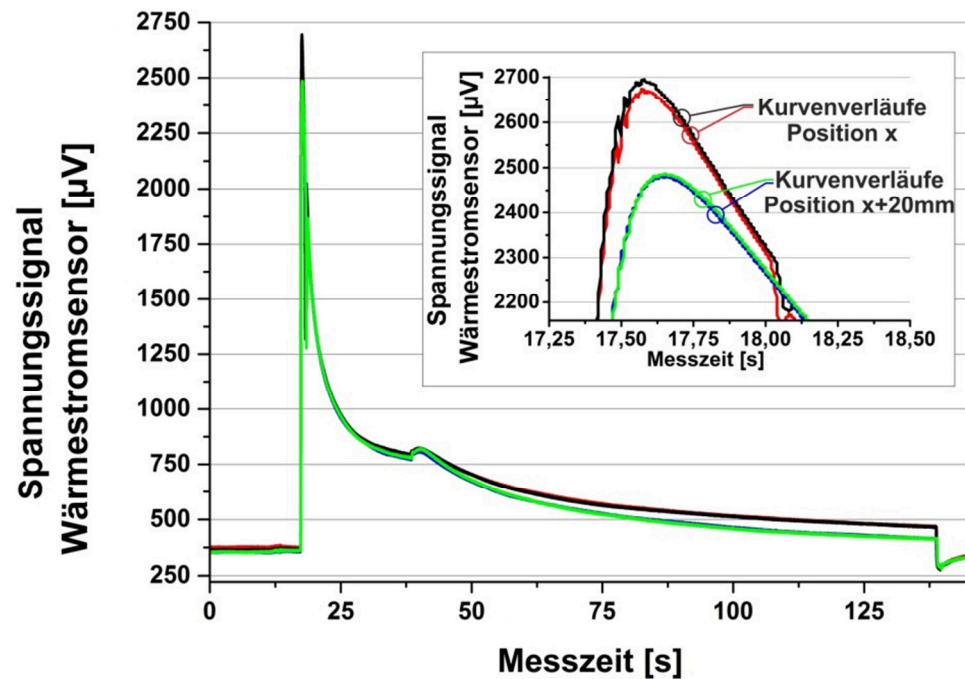


**Abbildung 77: Darstellung zur Positioniergenauigkeit einer Kunststoffprobe auf einem Wärmestromsensor (Übersichtsdarstellung, Detaildarstellung A und B)**

Im Abschnitt 6.5 wurde bereits erläutert, dass unterschiedliche Probekörperflächen zu veränderten Spannungssignalen führen können. Abbildung 78 zeigt, dass auch eine veränderte Positionierung des Probekörpers auf dem Sensor zu einem veränderten Spannungssignal führt. Hierzu wurden Probekörper gleicher Oberfläche der Abmaße 20mm x 6mm an zwei unterschiedlichen Stellen (Versatz der Positionen 20mm entlang des Sensors) auf dem Sensor plastifiziert. Zu erkennen ist, dass beide Positionen auf dem Sensor reproduzierbar sind, jedoch im direkten Vergleich zum Teil deutliche Unterschiede



bezüglich des Spannungsniveaus aufweisen. Folglich kann im Detail festgestellt werden, ob der Probekörper in der Fertigung richtig positioniert ist und eventuelle Teilbereiche des Probekörpers nicht oder nur unvollständig ausgeformt wurden. Auch können auf diese Art und Weise Verzug und Wanddickenschwankungen bei Bauteilen sicher detektiert und gegebenenfalls kompensiert werden.

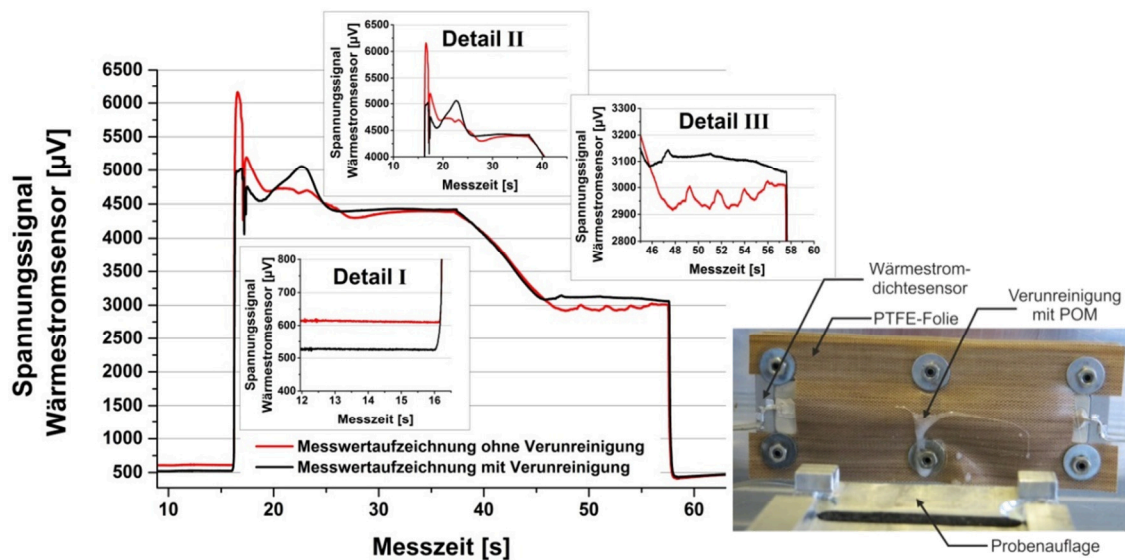


Material	Polystyrol
Probekörperabmaße [mm]	6 x 20
Heizelementtemperatur [°C]	200
Angleichzeit [s]	20
Angleichdruck [MPa]	0,20
Anwärmzeit [s]	100
Umstellzeit [s]	< 5
Fügezeit [s]	300
Fügedruck [MPa]	0,20
Sensor	ITI Corporation

**Abbildung 78:** Darstellung der Spannungssignale des Wärmestromsensors für zwei Probekörper positioniert auf dem Sensor an der Stelle X und zwei Probekörper an der Stelle x+20mm; Grundmaße Probekörper 20mm x 6mm

### 7.4.2. Überwachung des Sensorzustands

Die Wärmestrombilanzierung ist auch prädestiniert für eine Inline-Überwachung des Sensorzustandes. Abbildung 79 zeigt, dass im Falle einer Verunreinigung des Sensors dies anhand des Spannungssignals des Wärmestromsensors erkannt werden kann. Zum einen ist das Grundniveau des Sensors vor dem Schweißen höher, weil sich noch Kunststoff auf dem Heizelement befindet und den Sensor lokal „isoliert“ (siehe Abbildung 79, Detail I). Zum anderen ist ein weiteres Merkmal einer Verschmutzung, dass das maximale Sensorsignal in der Angleichphase stark begrenzt ist. Der Rückstand auf dem Heizelement ist bereits erwärmt und verhindert, dass an dieser Stelle der noch kalte Kunststoff des neuen Fügeteils unmittelbar mit dem Sensor in Verbindung kommt. Folglich ist das Spannungssignal des Wärmestromsensors nicht so stark ausgeprägt, als wäre die gesamte kalte Kunststoffoberfläche schlagartig mit dem Sensor in Verbindung gekommen (vgl. Abbildung 79, Detail II). Ein drittes Phänomen, an dem erkannt werden kann, dass sich eine Verschmutzung auf dem Heizelement bzw. dem Sensor gebildet hat ist, dass das Spannungssignal des Wärmestromsensors im Bereich der Anwärmphase auf einem höheren Niveau liegt als bei einer Schweißung ohne Verschmutzung. Der Grund hierfür ist, dass mehr Kunststoffschmelze im Anwärmsschritt vorliegt und die neu zu plastifizierende Schmelze sich aus der Verschmutzung und der Schmelze des Bauteils zusammensetzt und somit mehr Material dem Heizelement Wärme entzieht (Abbildung 79, Detail III).



Material	POM
Probekörperabmaße [mm]	6 x 50
Heizelementtemperatur [°C]	270
Angleichzeit [s]	20
Angleichdruck [MPa]	0,20
Anwärmzeit [s]	20
Umstellzeit [s]	< 5
Fügezeit [s]	300
Fügedruck [MPa]	0,20
Sensor	ITI Corporation

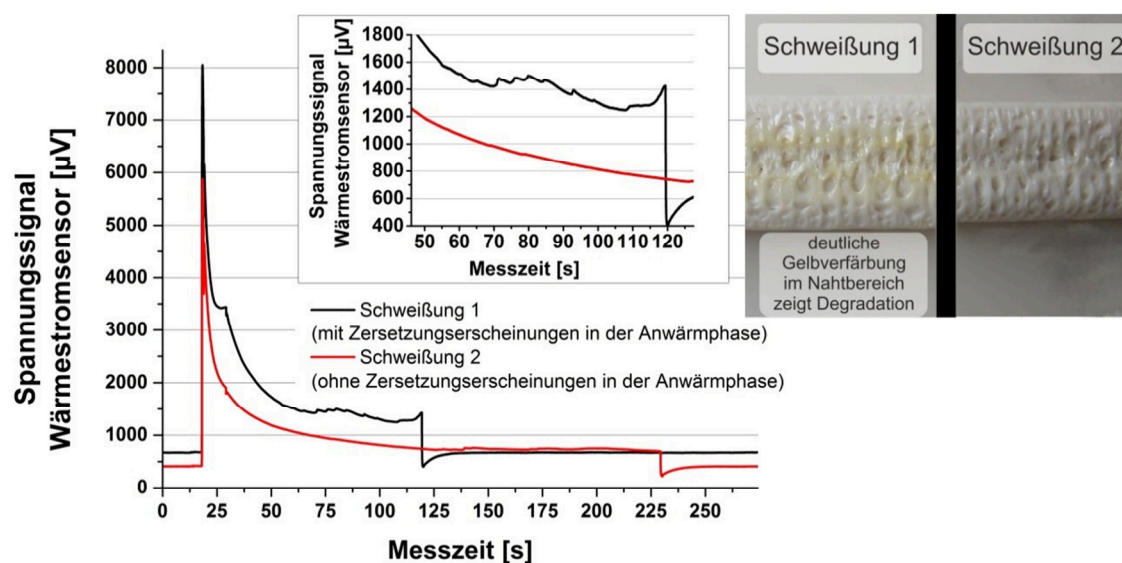
**Abbildung 79: Vergleich einer konventionellen Schweißung mit einer Schweißung, bei der das Heizelement verschmutzt war; Messwertaufzeichnung (oben), Realdarstellung (unten); Detail I: Detektion über Versatz Grundniveau; Detail II: Detektion über verringertes Spannungssignal des Wärmestromsensors in der Angleichphase; Detail III: Detektion über höheres Niveau in der Anwärmphase**

### 7.4.3. Thermische Beanspruchung des Materials

Mit der nachfolgenden Abbildung 80 soll verdeutlicht werden, dass die Wärmestrombilanzierung ein oberflächensensitives Verfahren darstellt und selbst fortgeschrittene Zersetzungsreaktionen der Fügeteile auf der Oberfläche sichtbar werden. Sobald die thermische Beanspruchung des Fügeteils in der Schweißebene auf der Sensoroberfläche zu hoch ist, beginnt das Material lokal zu degradieren. Die Zersetzung beinhaltet ein so genanntes Cracken (Aufbrechen) der Molekülketten. Im gezeigten Fall handelt es sich um ABS, was als Zersetzungsprodukt vorwiegend Kohlendioxid und Kohlenmonoxid zur Folge hat. Weiterhin können Monomere wie Acrylnitril, Styrol und 1,3-Butadien sowie diverse andere Spaltprodukte entstehen [Ens09]. Vor allem werden in

## 7. Ergebnisse und Diskussion

diesem Falle die gasförmigen Bestandteile von Bedeutung für den Kurvenverlauf sein, weil diese den Kontakt zur Heizelementoberfläche verändern und eine Blase mit Spaltprodukten eine andere Wärmeleitfähigkeit besitzt als reiner, nicht degradierter Kunststoff. Das Spannungssignal des Wärmestromsensors ist durch einen auffällig „unruhigen“ Kurvenverlauf gekennzeichnet.



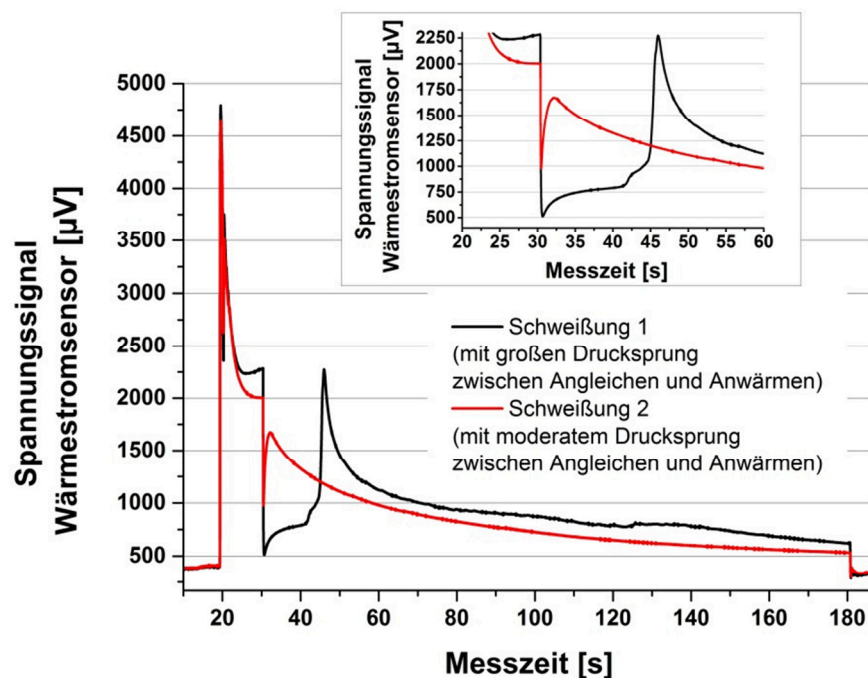
Kurvenbezeichnung	Schweißung 1	Schweißung 2
Material	ABS	ABS
Probekörperabmaße [mm]	6 x 50	6 x 50
Heizelementtemperatur [°C]	280	220
Angleichzeit [s]	10	10
Angleichdruck [MPa]	0,50	0,50
Anwärmzeit [s]	90	200
Umstellzeit [s]	< 5	< 5
Fügezeit [s]	300	300
Fügedruck [MPa]	0,15	0,15
Sensor	ITI Corporation	ITI Corporation

**Abbildung 80: Vergleich einer konventionellen Schweißung mit und ohne Zersetzungserscheinungen in der Anwärmphase; „unruhiger“ Kurvenverlauf deutet auf Zersetzungsreaktion hin**

### 7.4.4. Schweißparameteroptimierung

Das Spannungssignal des Wärmestromsensors bzw. die Wärmestrombilanzierung bietet sogar die Möglichkeit, entsprechend der Schweißmaschinencharakteristik eine Grundoptimierung der Drücke während des Schweißprozesses vorzunehmen. Abbildung 81 zeigt, dass die hier verwendete Schweißmaschine Unregelmäßigkeiten aufweist und bei großen Drucksprüngen zwischen Angleich- und Anwärmphase relativ lange nachregeln muss. Zu erkennen ist, dass bei der Schweißung 1 nach der Angleichphase der Druck soweit reduziert wird, dass der Kunststoff den Kontakt zum Sensor verliert. Die Schweißapparatur regelt zwar sofort wieder nach, was den erneuten Anstieg des Spannungssignals bei etwa 47s erklärt. Die Schweißmaschine ist zwischen 30s und 55s allerdings lediglich damit beschäftigt, die Folgen des Drucksprungs auszugleichen, was einem Zeitraum von 25s bedeutet und bei einer Anwärmzeit von hier 150s bereits über 16% der Anwärmzeit ausmacht. Innerhalb dieser 25s liegt der Kunststoff nicht sauber am Heizelement an und die Wärme kann nicht optimal in den Kunststoff diffundieren. Folglich führt eine solche Regelschwankung zu ungleichmäßigen Wulstausprägungen zwischen linkem und rechtem Fügeteil und zu nicht vorhersehbaren Schwankungen der Schweißnahtqualität. Zumal 150s Anwärmzeit relativ lange ist. Schweißungen unter 30s wären bei solch einer Einstellung der Schweißmaschine nicht reproduzierbar möglich. Der Drucksprung wurde in Folge dieser Beobachtung reduziert und die Schweißung 2 zeigt einen problemlosen Übergang von der Angleichphase zur Anwärmphase.

## 7. Ergebnisse und Diskussion



Kurvenbezeichnung	Schweißung 1	Schweißung 2
Material	PS	PS
Probekörperabmaße [mm]	6 x 50	6 x 50
Heizelementtemperatur [°C]	220	220
Angleichzeit [s]	10	10
Angleichdruck [MPa]	1,00	0,50
Anwärmzeit [s]	150	150
Umstellzeit [s]	< 5	< 5
Fügezeit [s]	300	300
Fügedruck [MPa]	0,15	0,15
Sensor	ITI Corporation	ITI Corporation

**Abbildung 81: Darstellung zur Aussagekraft der Wärmestrombilanzierung anhand eines Schweißzyklus mit großen und kleinem Drucksprung zwischen Angleich- und Anwärmphase; Schweißmaschine zeigt bei großem Drucksprung Regelproblematiken**

Im nachfolgenden (siehe Abbildung 82) soll exemplarisch noch gezeigt werden, dass hier weder ein Kraft- noch ein Wegsensor eine vergleichbare Aussage zulässt. Zu erkennen ist, dass weder in der Kraft- noch in der Wegaufzeichnung es möglich ist, einen Rückschluss auf den Kontakt Kunststoffprobe und Heizelement bzw. Kunststoffprobe und Wärmestromsensor zu realisieren. Es ist zwar zu sehen, dass der Kraftverlauf etwas länger benötigt, bis dieser ein konstantes Niveau erreicht hat, jedoch ist es nicht möglich, hieraus eine



Problematik bezüglich des Kontaktes Kunststoffprobe und Heizelement abzuleiten.

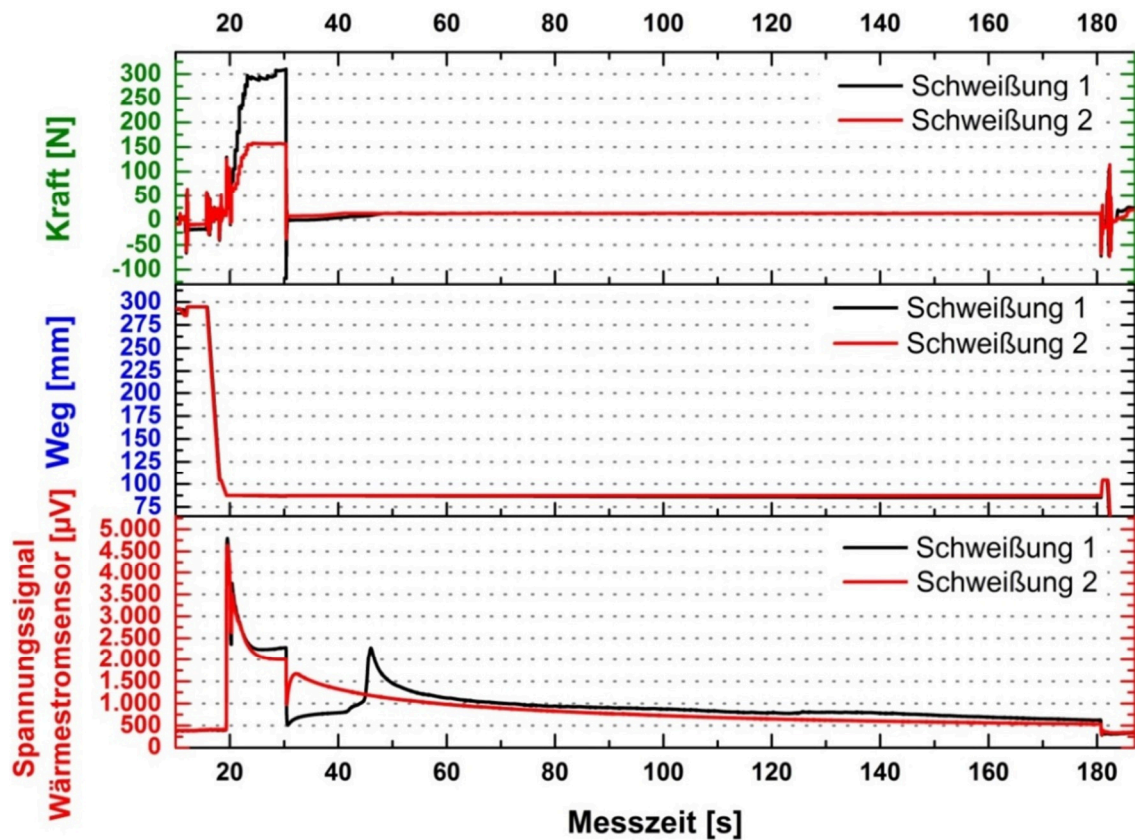


Abbildung 82: Darstellung zur Aussagekraft der Wärmestrombilanzierung gegenüber einer Kraft- und Wegaufzeichnung anhand eines Schweißzyklus mit großem und kleinem Drucksprung zwischen Angleich- und Anwärmphase; Schweißmaschine zeigt bei großem Drucksprung Regelproblematiken (Schweißparameter siehe Abbildung 81)

### 7.4.5. Parallele Temperaturmessung

Die Temperaturmessung parallel zum Wärmestromverlauf kann ebenso wie der eigentliche Wärmestromverlauf für eine Qualitätssicherung herangezogen werden. Es bietet sich im Falle eines integrierten Thermoelements im Wärmestromsensor an, dieses beispielsweise für eine direkte Oberflächenregelung des Heizelements heranzuziehen. Zumal die Kalibration und Überwachung von Temperaturkennwerten relativ unproblematisch ist. Abbildung 84 zeigt den Spannungsverlauf eines Wärmestromsensors für eine Schweißung bei 260°C und parallel hierzu die Aufzeichnung des im Sensor verbauten Thermoelements. Das Thermoelement im Wärmestromsensor wurde im Vorfeld kalibriert. Zu erkennen ist, dass trotz der an der Maschine eingestellten Heizelementtemperatur von 260°C an der Oberfläche des Heizelements im Sensor nur 256,6°C anliegen. Der Grund hierfür liegt zum einen im Aufbau und zum anderen in der Integration des Sensors in den Schweißprozess. Die Temperaturmessung, welche als Regelgröße der SPS übergeben wird, befindet sich in der Mitte des Grundträgers des Heizelementes zwischen den Heizpatronen. Da der Grundträger mit einer Aufsatzplatte und einer Sensorhalterung ausgestattet ist, entfernt sich die eigentliche Schweiß- bzw. Plastifizierebene vom ursprünglich im Heizelement verbauten Sensor. Das Mantelthermoelement im Zentrum des Grundträgers des Heizelements kann Temperaturunterschiede zwischen Sensoroberfläche und Mitte Grundträger nicht erkennen und somit mit Hilfe einer Regelung nicht kompensieren. Da, wie bereits im Grundlagen- teil erwähnt, von den DVS-Richtlinien nur relativ geringe Temperaturschwankungen und Abweichungen der Soll-Heizelementtemperatur zur Ist-Heizelementtemperatur zulässig sind, würde hier eine Berücksichtigung des Thermoelements im Wärmestromsensor deutliche Vorteile bezüglich der Temperierung des Heizelements bringen. Sicherlich muss hierbei berücksichtigt werden, dass das Thermoelement im Grundträger, bedingt durch seine Lage, deutlich träger und mit deutlich geringerer Intensität auf einen Schweißzyklus reagiert und entsprechend anders geregelt werden muss. Besonders kommt diese Thematik jedoch bei komplexen Fügegeometrien zum Tragen wo unterschiedliche Entfernungen Sensor-Fügeebe- ne vorherrschen (siehe Abbildung 83).



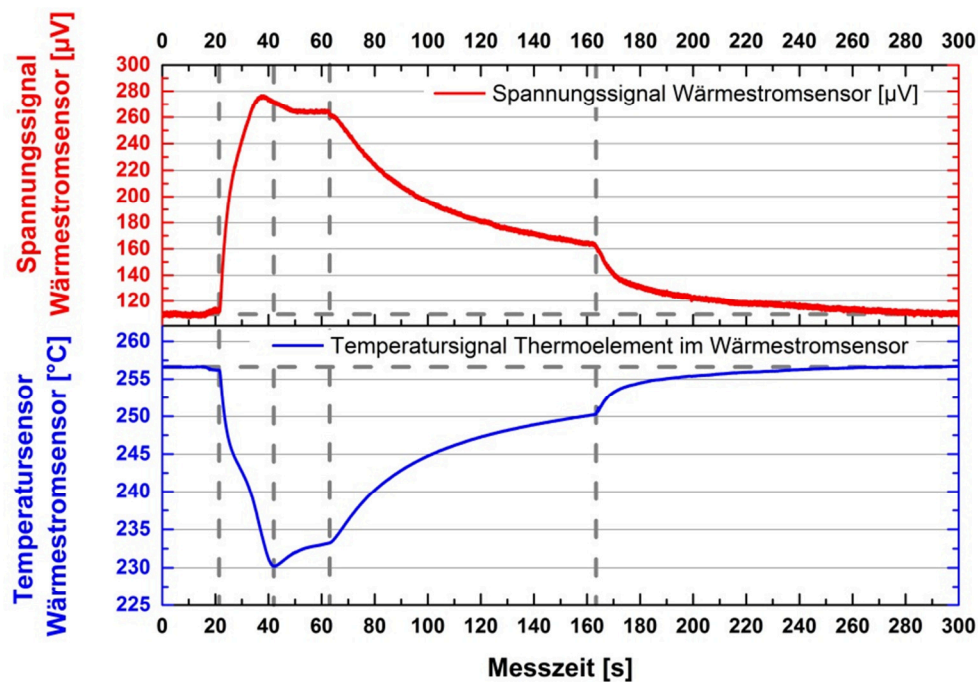


**Abbildung 83: Heizelementstumpfschweißen einer Beleuchtungseinheit eines PKW's; komplexe dreidimensionale Geometrie [Bie13]**

Ein weiterer Punkt, der charakteristisch für die Temperaturmessung mittels Thermoelement im Wärmestromsensor parallel zum Spannungssignal des Wärmestromsensors ist, dass der Temperaturverlauf nahezu spiegelverkehrt zum Wärmestromsignal verläuft. Auffällig ist, dass sowohl der Schweißbeginn als auch das Ende der Angleichzeit und das Ende der Anwärmzeit mit dem Wärmestromsensor als auch mit dem Thermoelement relativ zuverlässig detektiert werden können. Der einzige Messwert, der nicht identisch ist, ist das Maximum in der Angleichphase. Das verspätete Reagieren des Thermoelements lässt vermuten, dass dieses

sich für diese Bauteilgeometrie nicht optimal positioniert im Sensor befunden hat und daher später reagiert als die Thermosäule.

Unabhängig davon gibt das Thermoelement eine für diesen Probekörper und diese Schweißung charakteristischen Kurvenverlauf, der für Qualitätssicherungszwecke ebenso dienen kann wie der Wärmestromkennwert. Auch hier könnte mit einem Toleranzfeld gearbeitet und mögliche Fehler detektiert werden. Denn das Thermoelement kann dank der festen Positionierung im Wärmestromsensor reproduzierbar von dieser Stelle aus den Kurvenverlauf liefern.



Material	Polyethylen
Probekörperabmaße [mm]	10 x 50
Heizelementtemperatur [°C]	260
Angleichzeit [s]	20
Angleichdruck [MPa]	0,10
Anwärmzeit [s]	100
Umstellzeit [s]	< 5
Fügezeit [s]	80
Fügedruck [MPa]	0,10
Sensor	ITI-Company

**Abbildung 84:** Darstellung des Spannungssignals des Wärmestromsensor und der Temperatur des Thermoelements im Wärmestromsensor über die Messzeit

### 7.4.6. Theoretische energetische Bilanzierung eines konventionellen Heizelements für das Heizelementstumpfschweißen von Kunststoffen

Bei den nachfolgenden Ergebnissen handelt es sich um den bisher unveröffentlichten Stand der Wissenschaft im Bereich „Theoretische Wärmestrombilanzierung von Heizelementen zur energetischen Optimierung von Heizelementaufbauten für den Heizelementstumpfschweißprozess“. Da die Ergebnisse im Rahmen dieser Arbeit zwar entstanden sind, jedoch nicht das primäre Ziel der Arbeit darstellen, bieten sie dennoch eine hervorragende Möglichkeit zu zeigen, wie der Stand der Wissenschaft selbst von einer theoretisch durchgeführten Wärmestrombilanzierung auf diesem Gebiet profitieren kann. Hier-

zu ist im nachfolgenden ein konventioneller Heizelementaufbau betrachtet und eine Bilanzierung hinsichtlich Wärmeverluste erstellt worden. Dem Heizelement muss über elektrische Leistung so viel Energie zugeführt werden, dass die Verluste an die Umgebung über Wärmestrahlung und freie Konvektion sowie die Verluste durch Wärmeleitung an Anbauteile kompensiert werden können. Nur so kann das Heizelement auf konstanter Temperatur gehalten und für das Schweißen verwendet werden. Welche Verluste zu welchem Anteil relevant sind, wird anhand der nachfolgenden Berechnungen untersucht.

### Geometrie des Heizelements:

Länge: 0,2550 m

Breite: 0,2150 m

Dicke: 0,0150 m

Dicke der Heizwendeln: 0,0065 m

Schichtdicke der PTFE-Beschichtung:  $50 \times 10^{-6}$  m

### Randbedingungen:

Heizelementtemperatur  $T_0$ : 250 °C

Umgebungstemperatur  $T_{RT}$ : 20 °C

## 7. Ergebnisse und Diskussion

### a. Berechnung der Wärmestrahlung

Die Berechnung der Wärmestrahlung für einen konventionellen Heizelementaufbau erfolgt mit der im Abschnitt 3.1 erläuterten Gleichungen wie folgt.

Strahlung für ein Heizelement

$$\dot{Q}_S = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot [(T_0)^4 - (T_{RT})^4]$$

Strahlung für ein Heizelement mit PTFE-Beschichtung:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_S &= 0,95 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \cdot 123,76 \cdot 10^{-3} m^2 \\ &\cdot [(523,15K)^4 - (293,15K)^4] = \mathbf{450,1W} \end{aligned}$$

Strahlung für ein Heizelement ohne PTFE-Beschichtung:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_S &= 0,15 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \cdot 123,76 \cdot 10^{-3} m^2 \\ &\cdot [(523,15K)^4 - (293,15K)^4] = \mathbf{71,1W} \end{aligned}$$

Emissionsgrad Heizelement mit PTFE-Beschichtung	$\varepsilon_{\text{Heizelement mit PTFE-Beschichtung}} = \mathbf{0,95}$
Emissionsgrad Heizelement ohne PTFE-Beschichtung	$\varepsilon_{\text{Heizelement ohne PTFE-Beschichtung}} = \mathbf{0,15}$
Stefan-Boltzmann-Konstante	$\sigma = \mathbf{5,67 \cdot 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)}$
Körperoberfläche	$\begin{aligned} A &= A_{\text{vorne}} + A_{\text{hinten}} + A_{\text{Rand}} = \\ &= 54,83 \cdot 10^{-3} m^2 + 54,83 \cdot 10^{-3} m^2 \\ &\quad + 14,1 \cdot 10^{-3} m^2 = \\ &= \mathbf{123,76 \cdot 10^{-3} m^2} \end{aligned}$
Heizelementtemperatur	$T_0 = 250^\circ C = \mathbf{523,15K}$
Umgebungstemperatur	$T_{RT} = 20^\circ C = \mathbf{293,15K}$

### b. Berechnung freie Konvektion

Die Berechnung der Wärmestrahlung für einen konventionellen Heizelementaufbau erfolgt mit der im Abschnitt 3.1.1.1 erläuterten Gleichungen.

Strahlung für ein Heizelement mit

$$\dot{Q}_K = A \cdot \alpha \cdot [T_0 - T_{RT}]$$

Strahlung für ein Heizelement mit und ohne PTFE-Beschichtung:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_K &= A \cdot \alpha \cdot [T_0 - T_{RT}] = \\ &= 109,66 \cdot 10^{-3} \text{m}^2 \cdot 10,99 \text{Wm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot (523,15 \text{K} - 293,15 \text{K}) \\ &= \mathbf{277,10 \text{W}}\end{aligned}$$

Vertikale Körperoberflächen des Heizelements	$\begin{aligned}A_V &= A_{vorne} + A_{hinten} = \\ &= 54,83 \cdot 10^{-3} \text{m}^2 + 54,83 \cdot 10^{-3} \text{m}^2 \\ &= \mathbf{109,66 \cdot 10^{-3} \text{m}^2}\end{aligned}$
Heizelementtemperatur	$T_0 = 250^\circ \text{C} = \mathbf{523,15 \text{K}}$
Umgebungstemperatur	$T_{RT} = 20^\circ \text{C} = \mathbf{293,15 \text{K}}$
Wärmeübergangskoeffizient	$\begin{aligned}\alpha &= \frac{Nu \cdot \lambda}{l} \\ &= \frac{\mathbf{82,352} \cdot 0,03402 \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}{0,2550 \text{m}} = \\ &= \mathbf{10,99 \text{Wm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}\end{aligned}$
Wärmeleitfähigkeit der Luft bei mittlerer Temperatur (130°C)	$\lambda = \mathbf{0,03402 \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}$
Angeströmte Länge bzw. Höhe des Heizelements	$l = \mathbf{0,2550 \text{m}}$
Nußelt-Zahl	$\begin{aligned}Nu &= \left\{ 0,825 + 0,387 \cdot [Ra \cdot f_1(Pr)]^{\frac{1}{6}} \right\}^2 \\ &= \left\{ 0,825 + 0,387 \cdot [0,272 \cdot 10^9 \cdot 0,345]^{\frac{1}{6}} \right\}^2 \\ &= \mathbf{82,352}\end{aligned}$

## 7. Ergebnisse und Diskussion

Rayleigh-Zahl	$Ra = Gr \cdot Pr = 0,389 \cdot 10^9 \cdot 0,70$ $= \mathbf{0,272 \cdot 10^9}$
Grashof-Zahl	$Gr = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta\vartheta =$ $= \frac{9,81m \cdot s^{-2} \cdot (0,2550m)^3}{(2,68 \cdot 10^{-5}m^2 \cdot s^{-1})^2} \cdot 3,41$ $\cdot 10^{-3}K^{-1} \cdot 503,15K =$ $= \mathbf{0,389 \cdot 10^9}$
Fallbeschleunigung	$g = \mathbf{9,81m \cdot s^{-2}}$
Kinematische Viskosität der Luft bei mittlerer Temperatur (130°C)	$\nu = \mathbf{2,68 \cdot 10^{-5}m^2 \cdot s^{-1}}$
Räumlicher Wärmeausdehnungskoeffizient der Luft	$\beta = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{293,15K} = \mathbf{3,41 \cdot 10^{-3}K^{-1}}$
Temperaturdifferenz aus Wandtemperatur und Fluidtemperatur (ruhen-des Fluid)	$\Delta\vartheta = T_0 - T_{RT} = 250^\circ C - 20^\circ C = 230^\circ C$ $= \mathbf{503,15K}$
Prandl-Zahl bei mittlerer Temperatur (130°C)	$\mathbf{0,70}$
Funktion zur Berücksichtigung des Einflusses der Prandl-Zahl	$f_1(Pr) = \left[ 1 + \left( \frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{-\frac{16}{9}}$ $= \left[ 1 + \left( \frac{0,492}{0,70} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{-\frac{16}{9}} =$ $= \mathbf{0,345}$

### c. Berechnung der Wärmeleitung

Bei der Berechnung des Wärmestroms durch Wärmeleitung wird das Heizelement als Schichtaufbau interpretiert. Die innerste Schicht stellen die Heizwendeln dar, dann der Aluminiumgrundträger und außen befindet sich die Beschichtung aus PTFE. Da diverse Werte nicht oder nur mit enormem Aufwand exakt bestimmt werden können, wird der Wärmestrom durch Wärmeleitung in diesem Beispiel wie folgt berechnet:

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_{\text{gemessen}} - \dot{Q}_S - \dot{Q}_K$$

Der Minuend  $\dot{Q}_{\text{gemessen}}$  ist die real gemessene Leistungsaufnahme des Heizelements. Die Leistungsaufnahme wurde mit einem 4-Kanal-Leistungsmessgerät LMG450 der Fa. ZES ZIMMER Electronic Systems GmbH bestimmt. Da der so berechnete Wärmestrom nicht exakt mit dem eigentlichen Wärmestrom übereinstimmt, sondern noch weitere Verluste berücksichtigt, müsste dieser Wärmestrom eigentlich Wärmestrom/Verluste bezeichnet werden. Für die hier aufgeführte Betrachtung reicht allerdings die Genauigkeit vollkommen aus.

Für das Heizelement mit PTFE-Beschichtung wurde ein  $\dot{Q}_{\text{gemessen}}$  von 786,0 W (Mittelwert über 30 Minuten bei Heizelementtemperatur  $T_H$ ) gemessen. Für das Heizelement ohne PTFE Beschichtung konnte ein  $\dot{Q}_{\text{gemessen}}$  von 442,0 W (Mittelwert über 30 Minuten bei Heizelementtemperatur  $T_H$ ) bestimmt werden.

Folglich kann ein Wärmestrom durch Wärmeleitung  $\dot{Q}_L$  wie folgt ermittelt werden:

Wärmeleitung für ein Heizelement

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_{\text{gemessen}} - \dot{Q}_S - \dot{Q}_K$$

Wärmeleitung für ein Heizelement mit PTFE-Beschichtung:

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_{\text{gemessen}} - \dot{Q}_S - \dot{Q}_K = 786W - 450W - 277W = \mathbf{59W}$$

Wärmeleitung für ein Heizelement ohne PTFE-Beschichtung:

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_{\text{gemessen}} - \dot{Q}_S - \dot{Q}_K = 442W - 71W - 277W = \mathbf{94W}$$

## 7. Ergebnisse und Diskussion

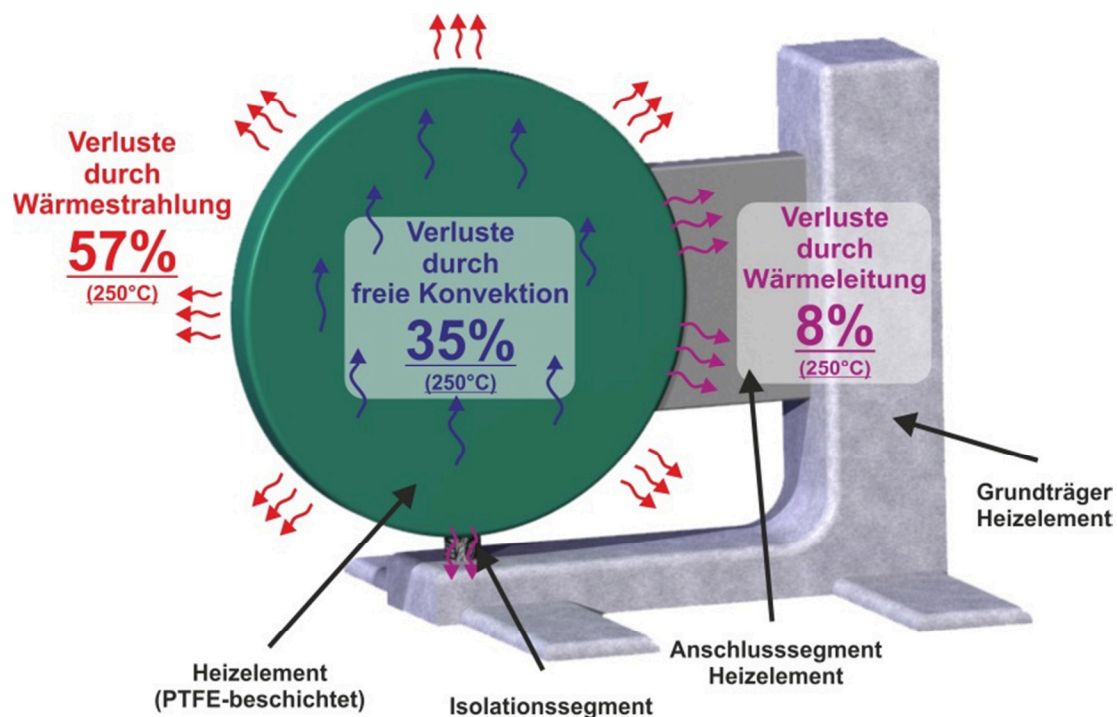
### d. Wärmestrombilanz

Die Wärmestrombilanzierung für ein konventionelles Heizelement sieht somit wie folgt aus (Tabelle 6).

**Tabelle 6: Wärmestrombilanz für ein konventionelles Heizelement mit und ohne PTFE-Beschichtung**

Art des Wärmestroms	Heizelement ohne PTFE-Beschichtung [W]	Heizelement mit PTFE-Beschichtung [W]
Wärmeleitung	94 (21%)	59 (8%)
Wärmestrahlung	79 (17%)	450 (57%)
Freie Konvektion	277 (62%)	277 (35%)
<b>Gesamtwärmestrom</b>	<b>442 (100%)</b>	<b>786 (100%)</b>

Abbildung 85 zeigt die Ergebnisse der theoretischen energetischen Bilanzierung eines Heizelements. Wie bereits erwähnt, hatte die Bilanzierung zum Ziel, die Wärmeverluste an einem Heizelement zu bestimmen und deren Anteile am Gesamtverlust.



**Abbildung 85: Prinzipielle Bilanzierung eines Heizelementes für das Heizelementstumpfschweißen von Kunststoffen**



In Abbildung 85 ist zu erkennen, dass das Heizelement in den Ruhephasen des Heizelementstumpfschweißprozesses bei Heizelementtemperatur ohne Anlage eines Kunststoffes etwa 57% seiner Wärme über Wärmestrahlung, 35% über Konvektion und lediglich 8% über Wärmeleitung (an Isolations- bzw. Anschlusssegmente) verliert. Ergebnis der Bilanzierung zeigt, dass sich folglich Optimierungen bezüglich des Heizelementaufbaus in jedem Falle mit der Verringerung der Wärmestrahlung und der Senkung des konvektiven Anteils beschäftigen sollten.

Die Wärmestrahlung und der über Wärmestrahlung übertragene Wärmestrom  $\dot{Q}_S$  ist, wie im Abschnitt 3.1 erläutert, direkt proportional zum Emissionskoeffizienten  $\varepsilon$ , der Stefan-Boltzmann-Konstante  $\sigma$  (Stefan-Boltzmann-Konstante  $(5,6696 \pm 0,0075) \cdot 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ), und zur Temperatur des Strahlers in der vierten Potenz. Folglich kann eine Senkung des Wärmestrahlungsanteils lediglich über eine Verringerung des Emissionskoeffizienten des Heizelements bzw. der Beschichtung erfolgen. Denn weder die Heizelementtemperatur, noch die Stefan-Boltzmann-Konstante kann geändert werden. Folglich wurden Untersuchungen angestellt, die derzeit verwendeten PTFE-Beschichtungen näher zu charakterisieren und zu substituieren.

Die derzeit zum Einsatz kommenden Polymerbeschichtungen besitzen bei Schweißtemperatur (Schweißtemperatur typischerweise zwischen 200°C und 300°C) einen Emissionskoeffizienten von in der Regel größer 0,8 [Sch12]. Der hohe Emissionsgrad wurde temperaturabhängig bestimmt mit der Erkenntnis, dass sich dieser mit zunehmender Temperatur weiter vergrößert. Aufbauend auf diesen Untersuchungen laufen bereits Versuche mit metallischen und keramischen Beschichtungen mit und ohne polymere Anteile in der Beschichtung mit großem Erfolg. Sowohl Beschichtungen auf metallischer als auch keramischer Basis besitzen meist deutlich geringere Emissionskoeffizienten im Bereich  $<0,3$  und zeigen sehr erfolgreich ein enormes energetisches Einsparpotential bei gleichzeitig vergleichbarer Standzeit und für viele Polymere zufriedenstellende Antihafteigenschaften. Für viele Standardpolymere stellt das Projekt schon jetzt alternative Schichtsysteme zur Verfügung, die sich derzeit noch in praxisnahen Tests behaupten, darunter Schichtsysteme für Massenkunststoffe wie PE und PP. Entsprechende Veröffentlichungen zu neuartigen energetisch optimierten Beschichtungen und deren Einsatz- sowie Einsparpo-

## 7. Ergebnisse und Diskussion

tentiale sind geplant. Abbildung 86 zeigt vorab schon einmal das rein energetisch ermittelte Einsparpotential. Bei dieser Betrachtung ist noch nicht eingeschlossen, dass nichtpolymere Beschichtungen meist eine längere Standzeit, einen schnelleren Aufheizvorgang des Heizelements dank verringerter Verluste und diverse andere Vorteile vorweisen können.

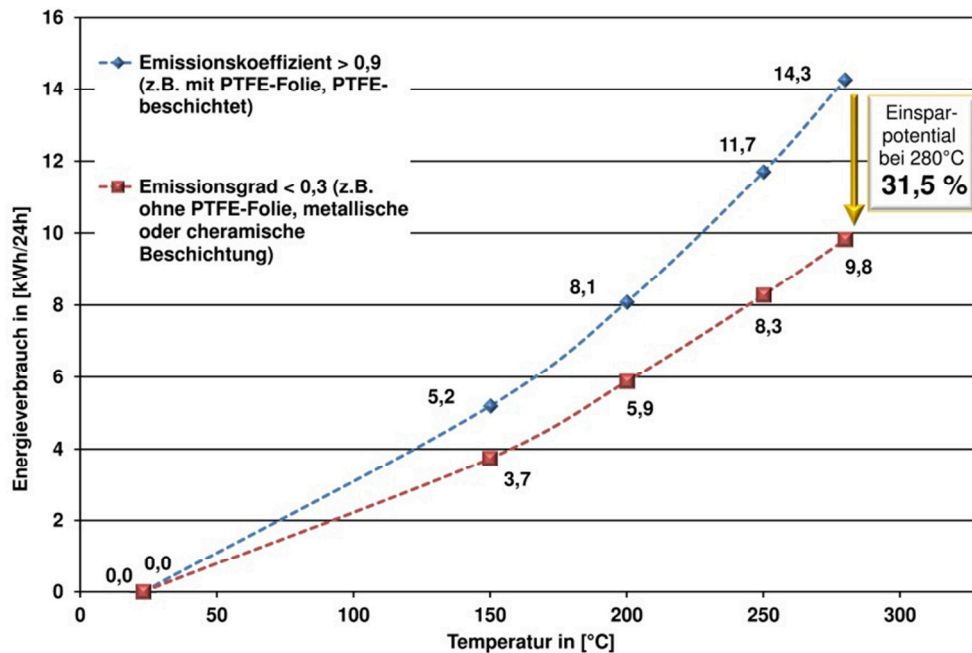
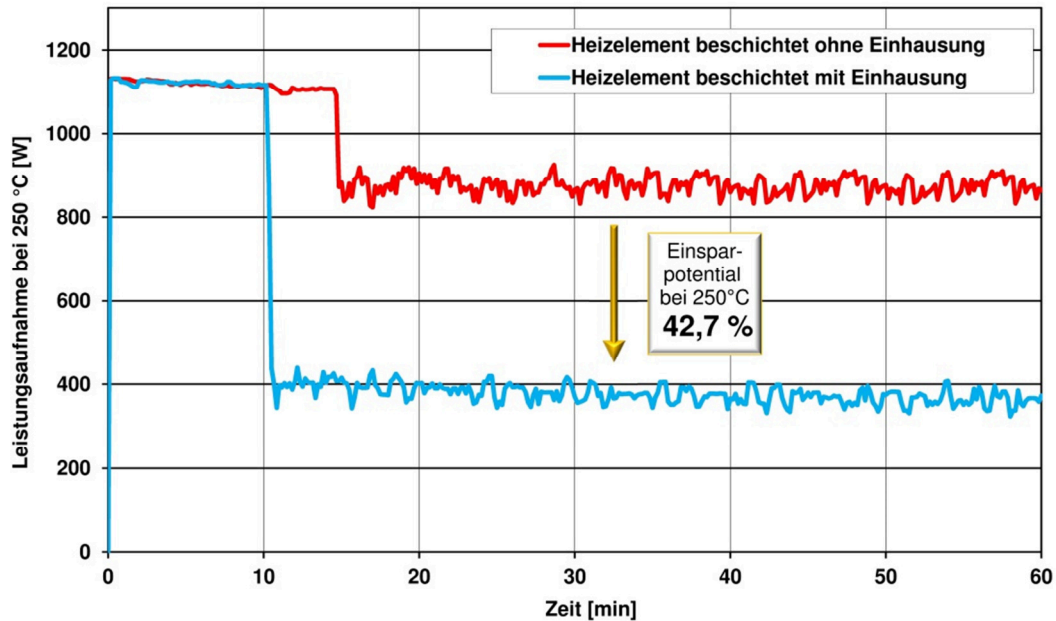


Abbildung 86: Energetisch ermitteltes Einsparpotential für Emissionskoeffizient > 0,9 und < 0,3

Bezüglich der hohen Wärmeverluste über Konvektion zeigt die einfache Wärmebilanzierung bei genauer Betrachtung, dass das Einsparpotential nicht direkt an einer Variablen festgemacht werden kann und über übergreifende Maßnahmen erfolgen muss. Eine Maßnahme, die Konvektion zu verringern wird derzeit in Form einer Einhausung für das Heizelement erprobt. Denn die Anwendung der Theorie aus Abschnitt 3.1 bewirkt auf einfache Weise, dass sich die Einhausung positiv, sprich verringernd, auf das Verhältnis  $d\vartheta$  (Verhältnis Temperatur Heizelement zu Temperatur Umgebung im Haupttherm, aber auch in Grashof-Zahl) auswirkt, somit den Wärmestrom an die Umgebung unmittelbar verringert und damit auch die Konvektionsverluste minimiert werden. Abgesehen davon kann die Einhausung sehr leicht und kostengünstig im inneren glänzend oder verspiegelt ausgeführt werden, was die Verluste durch Wärmestrahlung nochmals verbessert. Denn eine reflektierende Innenseite der Einhausung reflektiert die emittierte Strahlung des Heizelementes zu diesem zurück. Diese reflektierte Strahlung in Richtung Heizelement

stellt für das Heizelement somit wieder eine Art Wärmequelle dar, die den Energieverbrauch weiter senkt (vgl. Abbildung 87) [Sch12].



**Abbildung 87: Energetisch ermitteltes Einsparpotential für das Heizelement über die Nutzung einer Einhausung**

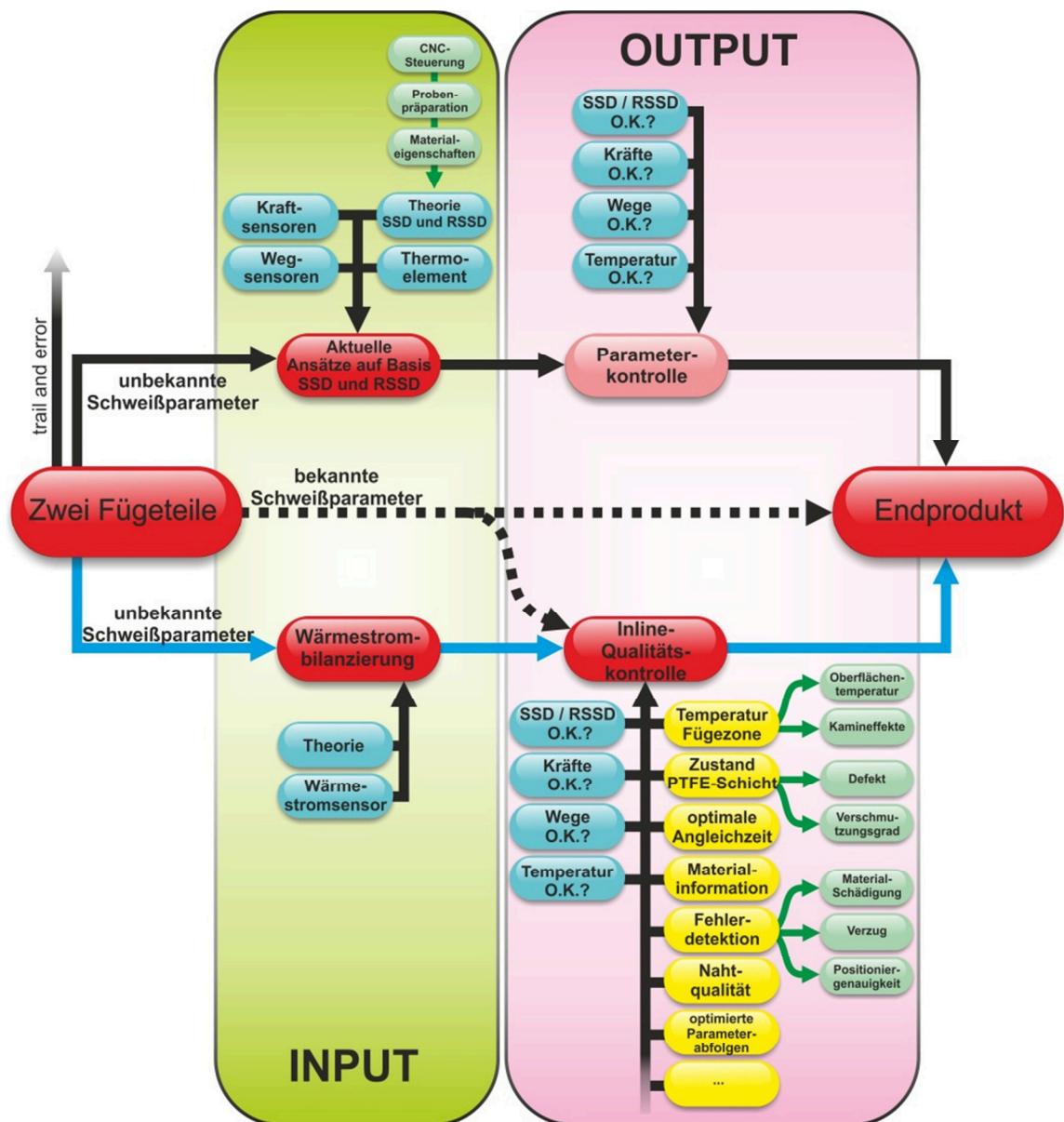
Alleine diese beiden angesprochen Maßnahmen, Senkung des Emissionsgrads und Einhausen des Heizelements, sind Resultate einer sehr einfachen Wärmestrombilanzierung des grundlegenden Heizelementaufbaus hinsichtlich seiner Wärmeverluste und zeigen das Potential der Wärmestrombilanzierung. Jede Maßnahme für sich hat bereits zu einer Energieeinsparung von 31,5% bzw. 42,7% geführt. Die Kombination aus beiden Maßnahmen hat in Vorversuchen eine Energieeinsparung von über 50%, gegenüber einem konventionellen Heizelementaufbau, bewirkt. Diese Art der Wärmestrombilanzierung hat sich lediglich der Betrachtung der formalen Zusammenhänge bedient und zeigt, dass sich selbst ohne Wärmestromsensoren eine energetische Bilanzierung ermöglichen lässt, die in diesem Falle dem Heizelementstumpfschweißen zu neuem Potential verhelfen kann.

### 7.4.7. Zwischenfazit Besonderheiten der Wärmestrombilanzierung

Abbildung 88 zeigt vier prinzipielle Möglichkeiten, im Heizelementstumpfschweißprozess von zwei Fügepartnern zu einem Fügeteil mit zufriedenstellenden Eigenschaften zu kommen hinsichtlich des benötigten In- und Outputs. Während sowohl das „Trail and Error“-Prinzip sicherlich kein wissenschaftlich und ökonomisch empfehlenswertes Verfahren ist, ist es ebenso selten, dass gerade in einer industriellen Fertigung die Schweißparameter bekannt sind. Und dennoch ist bei bekannten Schweißparametern der Output für eine Prozesssicherung ebenso gering wie der Input. Daher besteht derzeit eine der wenigen Möglichkeiten darin, sich aktuellen Ansätzen auf Basis der Schmelz- und Restschmelzschichtdicke zu bedienen. Allerdings kann schnell festgestellt werden, dass sich diese Methode keiner Sensortechnologie bedienen kann, die direkt in der Fügezone die thermodynamischen Vorgänge zwischen Heizelement und Kunststoff unmittelbar ohne weitere komplexe theoretische Ansätze sichtbar machen kann, obwohl in der Fügezone die dort herrschenden thermodynamischen Vorgänge die Grundlage dieses Schweißprozesses bilden. Folglich wurden in nahezu allen Prozessphasen des Heizelementstumpfschweißens eigens theoretische Ansätze entwickelt, um eine Parameterfindung und Qualitätssicherung auf Basis von dezentral (bezogen auf die Fügeebene) eingebauten Kraft-, Weg- und Temperatursensoren zu realisieren. Die Verknüpfung dieser dezentral gewonnenen Messsignale mit den Geschehnissen in der Fügeebene über die Nutzung vorwiegend der Restschmelzschichtdicke gestaltet sich jedoch in vielen Fällen sehr komplex und bringt mit sich, dass ein enormer Input von Nöten ist, um diese aktuellen Ansätze nutzen zu können. Und dennoch ist als Output aus diesen komplexen Ansätzen lediglich eine Art Parameterkontrolle zu generieren, die davon ausgeht, dass konstante Parameterabfolgen (lediglich Kontrolle ob Zielparameter erreicht oder nicht) mit gleichbleibenden Schweißnahtqualitäten gleichzusetzen sind.

Anders sieht dies erstmals bei der Wärmestrombilanzierung aus. Hier werden lediglich die Wärmestromsensoren und die dazugehörigen Theorien zum Verständnis der Wärmestromkurven als Input benötigt, um hieraus einen Output zu generieren, der nicht nur den Output bisheriger Ansätze beinhaltet sondern über diese hinaus vielfältigste relevante Kennwerte liefert, um den Fügeprozess zufriedenstellend zu charakterisieren, zu überwachen und Schweißabfolgen zu protokollieren.

Abbildung 88 zeigt, dass die Wärmestrombilanzierung die derzeit einzige Möglichkeit darstellt, eine Inline-Qualitätssicherung für das Heizelementstumpfschweißen zu realisieren und sogar im Falle von bekannten Schweißparametern eine hervorragende Möglichkeit darstellt, den Prozess zu überwachen.



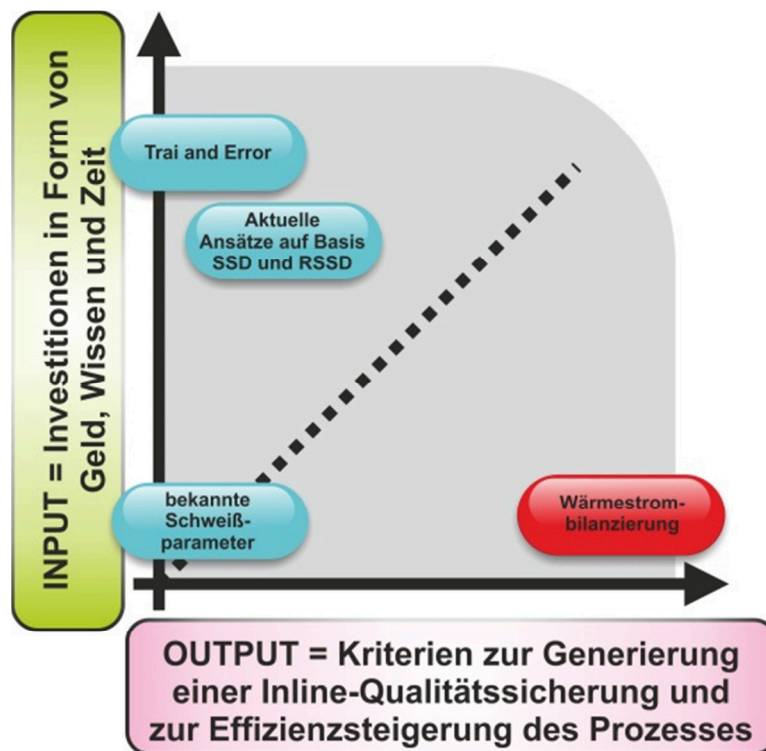


Abbildung 88: Gegenüberstellung von Ansätzen zur Generierung eines Endprodukts aus zwei Fügeteilen unter Berücksichtigung des In- und Outputs für diese Ansätze

## **8. Zusammenfassung**

Eine permanente Zielsetzung ist, Verarbeitungsprozesse zu optimieren, sprich bei gleichbleibender oder verbesserter Qualität den Ausschuss und den Energieverbrauch zu minimieren sowie die Geschwindigkeit und die Effizienz des Prozesses zu steigern. Die Ausarbeitung zum Thema „Untersuchungen zur Detektion und Kontrolle der Schweißnahtqualität beim Heizelementstumpfschweißen von Thermoplasten unter Berücksichtigung der Wärmestrombilanzierung“ hat sich dieser Herausforderung gestellt. Die Wärmestrombilanzierung, über den Einsatz von hochtemperaturbeständigen Wärmestromsensoren, verhilft dem bislang in vielen Bereichen der Kunststoffverbindungstechnik bereits etablierten Heizelementstumpfschweißverfahren durch ein neuartiges Inline-Qualitätssicherungsverfahren zu noch mehr Attraktivität, einer deutlich gesteigerten Effizienz und zu einer bis dato nicht dagewesenen Prozesssicherheit.

Während zu Beginn der Arbeit die grundlegende Thematik (Abschnitt 0) und die damit verbundene Motivation (Abschnitt 1.4) erläutert, der Stand der Wissenschaft (Abschnitt 2) dargestellt und die Herausforderungen und Chancen (Abschnitt 4) eines neuartigen Ansatzes zur Inline-Qualitätssicherung näher ausgeführt wurden, beschreibt der Abschnitt 5 die daraus abgeleitete Zielsetzung. Das in dieser Arbeit gesteckte Ziel bestand nun darin, mit Hilfe der neu entwickelten Wärmestrombilanzierung, realisiert über hochtemperaturbeständige Wärmestromsensoren, bisher nicht realisierbare prozess- und materialspezifische Kennwerte direkt in der Fügezone des Heizelementstumpfschweißprozesses zu generieren und diese für eine beschleunigte Schweißparameterfindung, eine bessere Qualität der Endprodukte und eine lückenlose Dokumentation der Nahtqualität zu nutzen.

In den Abschnitten 7.1.1 bis 7.1.7 konnten im Detail die Aussagekraft der Bilanzierung in den einzelnen Prozessphasen des Heizelementstumpfschweißprozesses aufgezeigt und bewertet werden. Eine Besonderheit ist, dass die Wärmestrombilanzierung erstmals die Möglichkeit bietet, prozess- als auch materialspezifische Aussagen direkt und in Echtzeit aus der Fügezone, dem qualitätsrelevanten Bereich des Fügeprozesses, zu generieren, mit dem sowohl Prozessregelungen als auch Prozessüberwachungen und Schweißparameteroptimierungen in einem möglich sind. Es konnte zunächst offengelegt werden,

## 8. Zusammenfassung

---

dass die Wärmestrombilanzierung ähnlich konventioneller Sensoren nahezu alle prozessrelevanten Phasen des Heizelementstumpfschweißens (bis auf die Umstell- und Fügephase) abbilden und charakterisieren kann. Hierzu zählen die Angleichzeit, der Angleichdruck, die Anwärmzeit und der Zeitpunkt des Umstellens des Heizelements. Die über die Wärmestrombilanzierung gewonnene Vielzahl an neuer, innovativer und aussagekräftiger Informationen über den Fügeprozess, erweitert bisherige Aussagen über konventionelle Kraft- und Wegsensoren enorm. Zusätzlich zu den bisherigen Phasen des Heizelementstumpfschweißprozesses (Angleichen, Anwärmen, Umstellen und Fügen) bedient sich die Wärmestrombilanzierung neuer prozessrelevanter Phasen, wie der Einrichtphase und der Bewegungsphase vor Angleichen. Die Wärmestrombilanzierung liefert erstmals und in Echtzeit eine Antwort auf folgende Fragen:

- Ist das Heizelement auf Betriebstemperatur, ausreichend konditioniert, homogenisiert und für eine Schweißung bereit?
- Welcher Emissionscharakteristik unterliegt das Heizelement? Existieren Kamineffekte oder ähnliche negative Umwelteinflüsse?
- Ist die Antihaftschicht in einem guten Zustand und frei von Verunreinigungen?
- Welche Heizelementtemperatur liegt vor?
- Hat sich das Heizelement in die Fügezone bewegt?
- Wann genau berührt der Kunststoff das Heizelement zum ersten Mal und wie lange beträgt dann die optimale Angleichzeit für dieses Bauteil?
- Konnten im Angleichschritt Bauteiltoleranzen, Unebenheiten und Verzug zufriedenstellend beseitigt werden?
- Wurde die optimale Angleichzeit eingehalten?
- Wird das richtige Material geschweißt oder liegt eine Materialverwechslung oder gravierende Chargenschwankungen vor?
- Wie lange sollte die Fügezeit mindestens betragen?

Diese bis dato gewonnen Erkenntnisse zur Wärmestrombilanzierung des Heizelementstumpfschweißprozesses wurden dann im Abschnitt 7.2 herangezogen, um eine Korrelation zwischen Wärmestrombilanzierung und Nahtqualität zu realisieren. Hierzu wurde ein neuer Kennwert, die Wärmestromdichteinformation  $\dot{q}_{3D}$ , generiert, der sowohl geometrische, materialspezifische als



auch prozessspezifische Faktoren beinhaltet und mit der Nahtqualität direkt korreliert. Unter anderem konnte für die Materialien PC, PS, ABS, PVC, PP und PE aufgezeigt werden, wo die optimalen Schweißparameter geometrie- und prozessabhängig zu finden sind. Weiterhin wurde ein universell anwendbarer Ansatz entwickelt, bei dem für alle hier untersuchten Polymere ein einheitlicher Datensatz eine zufriedenstellende Nahtqualität zur Folge hat. Sobald bei einer Heizelementtemperatur von 270°C eine Wärmestromdichteinformation  $\dot{q}_{3D}$  von 0,22  $\mu\text{V}/(\text{K}\cdot\text{mm}^2)$  in der Anwärmphase generiert wird, kann bei den untersuchten Materialien sowohl von einem zufriedenstellenden Schweißfaktor als auch von einer zufriedenstellenden Bruchdehnung ausgegangen werden. Die Überwachung und eine Regelung auf die geforderte Wärmestromdichteinformation  $\dot{q}_{3D}$  in der Anwärmphase kann voll automatisiert oder händisch über die entwickelten Ansätze erfolgen.

Der Abschnitt 7.3 beinhaltet diverse Besonderheiten der Wärmestrombilanzierung, die zum einen zum grundsätzlichen Prozessverständnis beitragen und zum anderen wichtige Aussagen für die Praxis darstellen. Hierzu zählt unter anderem die Darstellung der relevanten Einflussfaktoren auf die Simulation des Schweißprozesses, um im Vorfeld einer Fertigung rechnergestützt Aussagen zur Wärmestrombilanzierung und der damit verbundenen Nahtqualität zu erlangen (Abschnitt 7.3.1). Weiterhin ist dargestellt, wie in der Praxis sehr erfolgreich Positionierproblematiken, Verzug und somit auch fehlerhafte Bauteile (Abschnitt 7.4.1) bereits zu Beginn des Schweißprozesses über die Nutzung der Wärmestrombilanzierung erkannt werden können. Auch ist erläutert, wie dank der Wärmestrombilanzierung eine Überwachung des Heizelementaufbaus und der PTFE-Schicht möglich ist (Abschnitt 7.4.2). Die Wärmestrombilanzierung zeigt hochsensibel Verunreinigungen der Antihafbeschichtung an und kann die Notwendigkeit von beispielsweise Reinigungsintervallen oder den Tausch der Antihafbeschichtung des Heizelementes signalisieren (Abschnitt 7.4.2). Weitere Besonderheiten der Wärmestrombilanzierung sind, dass sofort erkannt werden kann, wenn die Schweißtemperatur zu hoch, die Anwärmzeit zu lang ist und deshalb das Polymer beginnt, sich zu zersetzen (Abschnitt 7.4.3). Die Wärmestrombilanzierung ermöglicht aber auch, eine Prozessoptimierung hinsichtlich der Regelcharakteristik der Schweißmaschine durchzuführen, um eine gleichbleibend hohe Nahtqualität zu erzielen

## 8. Zusammenfassung

---

(Abschnitt 7.4.1). Abschließend wird im Abschnitt 7.3 gezeigt, welche Potentiale in der Sensorgestaltung stecken. Die Einbringung von nahezu beliebig vielen Thermoelementen ermöglicht eine Überwachung gezielter qualitätsrelevanter Schweißbereiche ohne die Zykluszeit oder auch die Nahtqualität nachteilig zu beeinflussen (Abschnitt 7.4.5). Abschnitt 7.4.6 zeigt abschließend in diesem Kapitel, dass sogar ohne Wärmestromsensor rein über die Anwendung der theoretischen Zusammenhänge Optimierungspotentiale hinsichtlich der Hardware aufgedeckt werden können. Über die konsequente Anwendung und Umsetzung der Wärmestrombilanzierung auf ein Heizelement konnten Maßnahmen, wie die Substitution der Beschichtung oder auch der Einsatz von Einhausungen zu einer Reduzierung des Energieverbrauchs um bis zu 50% erreicht werden.

Der Abschnitt 7.3.1 bezieht sich im Detail nochmals auf die Kalibration des Wärmestromsensors, um hier auch im Hinblick auf weitere eigenständige Entwicklungen der Industrie die Herausforderungen und Alternativen zur klassischen Kalibration aufzuzeigen.

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass die Wärmestrombilanzierung mittels hochtemperatur-beständiger Wärmestromsensoren eine zuverlässige, reproduzierbare und universell einsetzbare Lösung darstellt, prozess- als auch bauteilspezifische Kennwerte direkt in der Fügezone zu generieren, und mit Hilfe dieser Kennwerte das Heizelementstumpf-schweißverfahren wirtschaftlicher, effizienter und ressourcenschonender in eine Fertigung zu implementieren. Hinzu kommt noch, dass in dieser Arbeit die grundlegenden Entwicklungen getätigt wurden, um sogar bisher verwendete Sensoren wie Weg- und Kraftsensoren über die Nutzung eines hochtemperaturbeständigen Wärmestromsensors zu substituieren und somit den Einsatz der Wärmestrombilanzierung nahezu kostenneutral zu realisieren. Die Möglichkeit der Inline-Qualitätssicherung entwickelt das Heizelementstumpfschweißverfahren zukunftsorientiert weiter und legt den Grundstein für einen verstärkten Einsatz dieses Fügeverfahrens.

## 9. Abstract

One permanent objective is to optimize manufacturing processes, i.e. with the quality remaining constant or even improving, to minimize waste and energy consumption and to increase the speed and efficiency of the processes. The elaboration of the subject on "Investigations of the Detection and Control of Welding Quality in Heated Tool Butt Welding of Polymers in View of Heat Flow Balancing" has risen to this challenge. Due to the use of high temperature heat flow sensors the heated tool butt welding is a common joining method in areas of polymer joining technology. The heat flow balancing is a novel possibility for an inline quality safeguard and gives the heated tool butt welding more attractiveness, a significant increase in efficiency and a process safety not known before.

While in the first part of the thesis, the basic topic (Section 0) and the motivation related to it (Section 1.4) are described, the stage of research (Section 2) is shown, the problems and opportunities (Section 4) of a novel approach to inline quality safeguard are elaborated, Section 5 illustrates the objective derived from it. Optimizations in the preliminary stages of the project already based on a theoretically conducted heat flow balancing of the hot plate of the heated tool butt welding (Section 7.4.6) had a more than positive effect on the energy balance of the total hot plate system and resulted in a practically relevant experimental set-up in energy savings of over 50%. The objective set in this thesis is to generate with the help of the newly developed heat flow balancing, realized by high temperature heat flow sensors, previously unattainable process- and material-specific characteristics directly out of the welding zone of the heated tool butt welding and to use them for an accelerated determination of welding parameters, a better quality of the final products and a complete documentation of the welding quality.

In Sections 7.1.1 to 7.1.7, the significance of balancing the individual phases of the heated tool butt welding can be identified and evaluated in detail. A special feature is that the heat flow balancing for the first time provides the possibility of generating process- and material-specific results directly and in real-time from the welding zone. These findings can be used for industrial process controls, process monitorings and optimizing welding parameters at the same time. First it is disclosed that the heat flow balancing, similar to conventional

sensors, can illustrate and characterize almost all process-relevant steps (except for the change-over and joining). These include the matching time, matching pressure, the heating-up time and the moment of the change-over of the hot plate. The multitude of new, innovative and significant information about the welding process obtained by using the heat flow balancing is enormously expanding previous evidence of conventional force and range sensors. In addition to the previous phases of the heating tool butt welding (matching, heating up, change-over and joining) the heat flow balancing makes use of new process relevant phases such as the set-up phase and the movement phase before matching. The heat flow offers an answer to the following questions in real-time for the first time:

- Is the heating element on operating temperature, sufficiently conditioned, homogenized and ready for welding?
- What is the emission characteristic of the hot plate? Do stack-effects or similarly negative environmental conditions exist?
- Is the non-stick coating in a good condition and free of contaminations?
- What is the temperature of the hot plate at the moment?
- Has the hot plate moved to the welding zone?
- When exactly does the plastic material touch the hot plate for the first time and how long is the optimal matching time for this component then?
- Was the matching time long enough to eliminate component tolerances, uneven patches and deformations satisfactorily?
- Was the optimal matching time strictly kept?
- Is the right material welded or does a material mistake or a serious batch variation exist?
- How long should the joining time take at least?

These findings discovered to date of the heat flow balancing of the heated tool butt welding are used in Section 7.2 in order to realize a correlation between heat flow balancing and welding quality. For this purpose, a new parameter, the heat flux information  $\dot{q}_{3D}$ , is generated which includes both geometric, material-specific and process-specific factors and correlates directly with the welding quality. Among other things, for the materials PC, PS, ABS, PVC, PP and PE it could be shown, where the optimal welding parameters can be

found geometry- and process- dependantly. Furthermore, a universally applicable approach is developed for the aforementioned materials, which provides consistent parameters to generate a satisfactory welding quality. Once a heating temperature of 270°C and a heat flux information  $\dot{q}_{3D}$  of 0.22  $\mu\text{V}/(\text{K}\cdot\text{mm}^2)$  are generated in the heat-up phase, both a satisfactory welding factor and breaking strain can be generated by the materials analyzed. The monitoring and the controlling of the required heat flux information  $\dot{q}_{3D}$  in the heating-up time can be done fully automatically or by hand with the help of the approaches developed.

Section 7.3 includes several special features of the heat flow balancing which contribute to the fundamental understanding of the process on the one hand and provide very important findings for the practice on the other hand. This includes, among other things, the presentation of the relevant factors in the simulation of the welding process in order to obtain computerized evidence of the heat flow balancing and the welding quality associated with it in the preliminary stages of a production (Section 7.3.1). Moreover, it is shown how the heat flow balancing can very successfully identify positioning problems of the welding parts, deformations and thus faulty components (Section 0) already at the beginning of the welding process. It is also illustrated that the heat flow balancing can be employed for the monitoring of the hot plate and the PTFE layer (Section 7.4.2). The heat flow balancing is highly sensitive to contaminations of the non-stick coating and can e.g. indicate the necessity of cleaning intervals or the change of the non-stick coating of the hot plate (Section 7.4.2). Other special characteristics of the heat flow balancing are to indicate when the welding temperature is too high, the heating-up time too long and the sample therefore starts to degrade (Section 7.4.3). The heat flow balancing also enables an optimization of the process with regard to the controlling of the welding machine in order to get an invariably high welding quality (Section 0). Finally, the Section 7.3 demonstrates the various potentials of designing the sensors. The integration of nearly any number of thermal elements makes it possible to selectively monitor quality relevant welding zones without influencing the cycle time or the welding quality negatively (Section 7.4.5).

## 9. Abstract

---

Section 7.3.1 refers in detail once more to the calibration of the heat flow sensors to help industry using the results of this thesis for independent calibration developments. Besides, possible problems and alternatives of the classical calibration are outlined.

This thesis elucidates the fact that the heat flow balancing using high temperature resistant heat flow sensors is a reliable, reproducible and universally applicable solution to generate process- and component-specific parameters directly in the welding zone. With the help of these parameters the heated tool butt welding can be implemented into a production in a more economical, more efficient and resource saving manner at the same time. The possibility of the inline quality protection further develops a future-oriented heating tool butt welding and lays the foundation for an increased use of this joining process.

## 10. Ausblick

Die Inline-Wärmestrombilanzierung hat gezeigt, dass sie das Potential besitzt, selbst langjährige und etablierte Prozesse, wie das Heizelementstumpfschweißen, entscheidend weiterzuentwickeln und neue zukunftsorientierte Ansätze zu liefern, das Verfahren noch wirtschaftlicher und zuverlässiger ablaufen zu lassen. Die theoretische und experimentelle Umsetzung der Wärmestrombilanzierung ist für das Heizelementstumpfschweißen im Rahmen dieser Arbeit erfolgreich umgesetzt worden. Auch wurden verschiedene für die Praxis relevante Ansätze erläutert, die von Industrieunternehmen direkt aufgegriffen und umgesetzt werden können.

Der nächste Schritt sollte aus aktueller Sicht sein, die Wärmestrombilanzierung für das Heizelementstumpfschweißen in die Serie zu übernehmen und tiefergehend fallspezifische Adaptionen vorzunehmen, um das dargestellte Potential voll auszunutzen. Konkrete Ansätze werden beispielsweise in Verbindung mit der vorgestellten energetischen Bilanzierung und Optimierung des Heizelements gesehen, wie sie im Abschnitt 7.4.6 bereits angesprochen wurden. Die Nutzung alternativer Antihafbeschichtungen in Kombination mit einer Einhausung könnten es beispielsweise ermöglichen, über eine temporäre Abschaltung der Heizelemente in den Ruhephasen deutlich Energie einzusparen. Die Wärmestrombilanzierung stellt hierbei die ideale Sensortechnologie dar, um zu detektieren, wie lange ein Heizelement jeweils braucht, um im Bereich der Fügezone wieder homogen aufgeheizt zu sein. Auch kann der Wärmestromsensor genutzt werden, um zu überwachen, welche Verluste trotz alternativer Beschichtungen und Einhausungen vorliegen und ob das Heizelement zu Beginn der jeweiligen Schweißung wieder auf Einsatztemperatur ist. Die Umstell- und Fügephase kann je nach Kunststoff und Verfahren zeitlich gesehen bis zu 50% des Schweißprozesses ausmachen. Überlegungen, das Heizelement in dieser Phase auszuschalten, bieten ein enormes Einsparpotential.

Weiterhin sollte ein weiterer Schritt sein, Ansätze zu entwickeln, wie die Wärmestrombilanzierung auch anderen Fügeverfahren zu gesteigerter Produktivität und höherer Effizienz verhelfen kann. Denn nahezu alle Fügeverfahren und allem voran die Schweißverfahren, aber auch viele Klebverfahren, nutzen die Verfahrensparameter Druck, Temperatur und Zeit in irgendeiner

Form. Ob und in welchem Umfang die Wärmestrombilanzierung wirtschaftlich vertretbar ist und eingesetzt werden kann, muss individuell betrachtet werden. Vorstellbar wäre beispielsweise der Einsatz der Wärmestrombilanzierung beim Warmgasextrusionsschweißen, wo der Wärmestromsensor, integriert in den Schweißschuh, Informationen über die Konditionierung, die Anlage des Schweißschuhs und die Qualität des plastifizierten Materials geben könnte. Für eine gute Nahtqualität muss der Schweißschuh zunächst ausreichend vorgewärmt sein und zum anderen der Extruder die Wulst ausformen und den Schweißdruck über den Schweißschuh konstant und gleichmäßig aufbringen. Ein ungleichmäßiger Wärmestromverlauf würde bedeuten, dass der Kontakt zur Schmelze nicht ausreichend und somit der Schweißdruck ebenso nicht ausreichend ist. Als weiteres Beispiel könnte der Wärmestromsensor aber auch bei Reaktionsklebern eingesetzt werden, bei denen die chemische Reaktion unter paralleler Hitzeentwicklung stattfindet. Die Integration des Wärmestromsensors in die Klebeauflage oder die Haltevorrichtung zum Aushärten der Bauteile könnte eine Charakterisierung des Aushärtegrades auf Basis des freiwerdenden Energiebedarfs in Form, sprich anhand der Hitzeentwicklung denkbar sein.



## 11. Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung / Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
<b>AG</b>	[-]	Prozessphase Angleichen
<b>AW</b>	[-]	Prozessphase Anwärmen
<b>HS</b>	[-]	Heizelementstumpfschweißen
<b>F</b>	[-]	Prozessphase Fügen
<b>U</b>	[-]	Prozessphase Umstellen
Kunststoffe	Einheit	Beschreibung
<b>ABS</b>		Acrylnitril/Butadien/Styrol-Copolymer
<b>PE</b>		Polyethylen
<b>PE-HD</b>		Polyethylen High Density
<b>PP</b>		Polypropylen
<b>PS</b>		Polystyrol
<b>PTFE</b>		Polytetrafluorethylen
<b>PVC</b>		Polyvinylchlorid
<b>PC</b>		Polycarbonat
Verbände und Firmen		Beschreibung
<b>GKV</b>		Gesamtverband der kunststoffverarbeitenden Industrie e.V.
<b>SKZ</b>		Süddeutsches Kunststoff-Zentrum, FSKZ e. V. Fördergemeinschaft für das Süddeutsche Kunststoff-Zentrum
<b>KRV</b>		Kunststoffrohrverband e.V., Fachverband der Kunststoffrohr-Industrie
<b>DVS</b>		Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.

## 11. Abkürzungsverzeichnis

Formel- zeichen	Einheit	Beschreibung
$A$	$[m^2]$	Fläche
$A$	$[m^2]$	Durchtrittsfläche des Wärmestroms
$a$	$[m^2/s]$	Temperaturleitfähigkeit
$a_M$	$[m^2/s]$	Temperaturleitfähigkeit der Schmelze
$c_1$	$[-]$	materialabhängiger Kennwert
$c_2$	$[-]$	materialabhängiger Kennwert
$c_3$	$[-]$	materialabhängiger Kennwert
$c_P$	$[J/(kg \cdot K), m^2/(K \cdot s^2)]$	spezifische Wärmekapazität
$d$	$[m]$	Bauteildicke
$\varepsilon$	$[-]$	Emissionskoeffizient
$\varepsilon$	$[\%]$	Dehnung
$\varepsilon_B$	$[\%]$	Bruchdehnung
$\varepsilon_M$	$[\%]$	Dehnung bei der Zugfestigkeit
$\varepsilon_Y$	$[\%]$	Streckdehnung
$\varepsilon_{tB}$	$[\%]$	Nominelle Bruchdehnung
$g$	$[m/s^2]$	Fallbeschleunigung
$Gr$	$[-]$	Grashof-Zahl
$h_M$	$[J/kg, m^2/s^2]$	Enthalpiewert der Schmelze
$h_{Mel}$	$[J/kg]$	Enthalpiewert im Bereich Festkörper zu Schmelze
$h_S$	$[J/kg, m^2/s^2]$	Enthalpiewert des Festkörpers
$K$	$[Pas^n, (kg/(m \cdot s))^n]$	über Temperatur gemittelter Koeffizient des Potenzfließgesetzes
$l$	$[m]$	Angeströmte Länge bzw. Höhe des Heizelements
$L_0$	$[m]$	Schmelzschichtdicke
$L_A$	$[m]$	Schmelzschichtdicke in der Angleichphase
$\lambda$	$[W/(m \cdot K), (kg \cdot m)/(s^3 \cdot K)]$	Wärmeleitfähigkeit
$n$	$[-]$	Exponent des Potenzfließgesetzes
$\eta$	$[kg/(m \cdot s)]$	Viskosität
$Nu$	$[-]$	Nusselt-Zahl
$P_{elektrisch}$	$[V \cdot A]$	Elektrische Leistung
$p_A$	$[kg/m \cdot s^2]$	Angleichdruck
$Pe$	$[-]$	Peclét Zahl
$Pr$	$[-]$	Prandtl-Zahl
$\pi_P$	$[-]$	Dimensionslose Kennzahl beim Angleichen
$\dot{q}$	$[W/m^2, kg/s^3]$	Wärmestromdichte

## 11. Abkürzungsverzeichnis

$\dot{Q}$	[W, (kg·m <sup>2</sup> )/s <sup>3</sup> ]	Wärmestrom
$\dot{Q}_K$	[W, (kg·m <sup>2</sup> )/s <sup>3</sup> ]	Wärmestrom hervorgerufen durch Konvektion
$\dot{Q}_L$	[W]	Wärmestrom hervorgerufen durch Wärmeleitung
$\dot{Q}_L$	[W, (kg·m <sup>2</sup> )/s <sup>3</sup> ]	Wärmestrom hervorgerufen durch Leitung
$\dot{q}_{L_A,M}$	[W, (kg·m <sup>2</sup> )/s <sup>3</sup> ]	Wärmestrom an der Stelle x = L <sub>A</sub> der Schmelze
$\dot{q}_{L_A,S}$	[W, (kg·m <sup>2</sup> )/s <sup>3</sup> ]	Wärmestrom an der Stelle x = L <sub>A</sub> des Feststoffes
$\dot{Q}_S$	[W, (kg·m <sup>2</sup> )/s <sup>3</sup> ]	Wärmestrom hervorgerufen durch Strahlung
$Ra$	[-]	Rayleigh-Zahl
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte
$\rho_M$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte der Schmelze
$\rho_S$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte des Festkörpers
$s$	[-]	Ortskoordinate senkrecht zur Durchtrittsfläche A
$\beta$	[1/K]	Räumlicher Wärmeausdehnungskoeffizient
$s_A$	[m]	Angleichweg
$\sigma$	[W/(m <sup>2</sup> ·K <sup>4</sup> ), kg/(s <sup>3</sup> ·K <sup>4</sup> )]	Stefan-Boltzmann-Konstante
$\sigma$	[N, (kg·m)/s <sup>2</sup> ]	Spannung
$\sigma_B$	[N, (kg·m)/s <sup>2</sup> ]	Bruchspannung
$\sigma_M$	[N, (kg·m)/s <sup>2</sup> ]	Zugfestigkeit
$\sigma_y$	[N, (kg·m)/s <sup>2</sup> ]	Streckspannung
$t$	[s]	Zeitraum des Wärmetransports
$T$	[°C]	Bezugstemperatur
$T_0$	[°C]	Umgebungstemperatur
$t_A$	[s]	Angleichzeit
$T_{fl}$	[°C]	Fließtemperatur
$T_G$	[°C]	Glasübergangstemperatur
$T_{Gr}$	[°C]	Grenzflächentemperatur
$T_H$	[°C]	Heizelementtemperatur
$T_K$	[°C]	Kristallitschmelztemperatur
$T_{RT}$	[°C]	Raumtemperatur
$\Delta\vartheta$	[°C]	Temperaturgradient
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	kinematische Viskosität der Luft
$\nu_{x,M}$	[m/s]	Geschwindigkeit der Schmelze in x-Richtung
$\nu_{x,S}$	[m/s]	Geschwindigkeit des Feststoffs in x-Richtung
$\Theta_K = \Theta_{fl}$	[-]	Dimensionslose Schmelztemperatur

### 12.Literaturverzeichnis

---

[3Pi13]	3 Pi Consulting & Management GmbH, Verfahrensdarstellung Heizelementstumpfschweißen, <a href="http://www.3-pi.de">www.3-pi.de</a> , Internetauftritt (2013)
[Aca13]	Academic dictionaries and encyclopedias, Internetauftritt, <a href="http://universal_lexikon.deacademic.com/146762/P%C3%A9clet-Zahl">http://universal_lexikon.deacademic.com/146762/P%C3%A9clet-Zahl</a> (2013)
[Ahl13]	Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Produktdarstellung Wegtas-ter, potentiometrisch FWA xxx TR, <a href="http://www.ahlborn.de/getfile.php?2093.pdf">http://www.ahlborn.de/getfile.php?2093.pdf</a> (2013)
[Amo06]	Amouzandeh, A.: Konzeption und Modellierung eines Sensors zur Mes-sung des Wärmestroms zwischen einer reagierenden Strömung und einer Wand, Diplomarbeit Institut für Thermodynamik und Energiewandlung und Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (2006)
[Arc13]	ArcGIS Resource Center: Funktionsweise des Werkzeugs Kriging, <a href="http://help.arcgis.com/de/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//009z00000076000000">http://help.arcgis.com/de/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//009z00000076000000</a> , Internetauftritt (2013)
[Atk82]	Atkinson, W. H., Strange, R. R.: Developpent of advanded high-temperature heat flux sensors, NASA Lewis Research Center Contract NAS 3-22133 (1982)
[Bal85]	Bales, E., Bomberg, M., Courville, G. E.: Building Applications of Heat Flux Transducers, ASTM special technical publication: 885, IS`BN 0-8031-0438-3 (1985)
[Bea88]	Beasley, D. E., Figliola, R. S.: A generalised analyses of a local heat flux probe, Journal of Physics E Scientific Instruments 21 (1988)
[Bec07]	Beckmann, M., Krüger, S., Magel, G., Spiegel, W.: Online-Bestimmung des Wärmestroms auf Membranverdampferwände von Dampferzeugern, Ener-gie aus Abfall – Band 2, TK Verlag Karl Thomé Kozmiensky (2007)
[Bec10]	Beckmann, M., Rostkowski, S.: Optimierung von Biomasse und Abfallver-brennungsanlagen durch Monitoring, Energie aus Abfall – Band 7, ISBN 379-3-935317-46-7, TK-Verlag Karl Thomé-Kozmiensky (2010)
[Ber04]	Bernhard, F.: Technische Temperaturmessung, ISBN 3-540-62672-7, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York (2004)
[Bie13]	Bielomatik Leuze GmbH + Co. KG: Maschinen für das Heizelement-Schweißen von Kunststoffen, Factsheet K21xx · K 22xx, <a href="http://www.bielomatik.de/bkmauto/factsheet_heizelement_de_10_bkm/">http://www.bielomatik.de/bkmauto/factsheet_heizelement_de_10_bkm/</a> (2013)

---

[Boc06]	Von Böckh, P.: Wärmeübertragung, Grundlagen und Praxis, ISBN-10 3-540-31432-6, 2 Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2006)
[Bon09]	Bonnet, M.: Kunststoffe in der Ingenieur Anwendung – verstehen und zuverlässig auswählen, ISBN 978-8348-0949-8, Vieweg + Teubner Verlag GmbH Wiesbaden (2009)
[Bri98]	Briels, W. J.: Theory of Polymer Dynamics, Downloadbereich W.J. Briels <a href="http://cbp.tnw.utwente.nl/PolymeerDictaat/index.html">http://cbp.tnw.utwente.nl/PolymeerDictaat/index.html</a> (1998)
[Car59]	Carslaw, H. S., Jaeger, J. C.: Conduction of Heat in Solids, Oxford Press (1959)
[Cas00]	Casagrande, M.: Untersuchung der Ordnung und Diffusion von Polymerdispersionen bei der Verfilmung, Dissertation Johannes Gutenberg-Universität, Fachbereich Chemie und Pharmazie (2000)
[Che03]	Chen, X. D., Nguang, S. K.: The Theoretical Basis of Heat Flux Sensor Pen, Journal of Applied Mathematics and Decision Sciences 7 (2003)
[Chi99]	Childs, P. R. N., Greenwood, J. R., Long C. A.: Heat flux measurement techniques, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Volume 213 Part C (1999)
[Dil99]	Diller, T., E.: Heat Flux, <a href="http://dsp-book.narod.ru/MISH/CH34.PDF">http://dsp-book.narod.ru/MISH/CH34.PDF</a> (1999)
[DIN96]	DIN EN ISO 527-1: Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 1: Allgemeine Grundsätze (Fassung April 1996), DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin (1996)
[DKM12]	Deutsches Kunststoff Museum: Zeittafel zur Geschichte der Kunststoffe, <a href="http://www.deutsches-kunststoff-museum.de/index.php?id=791">http://www.deutsches-kunststoff-museum.de/index.php?id=791</a> (2012)
[Doi86]	Doi, M., Edwards, S.F., The theory of polymer dynamics, The Clarendon Press, Oxford University Press (1986)
[DVS07]	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V. (DVS): Forschung in der Fügetechnik – Innovation für die Wirtschaft, DVS-Forschungsvereinigung Geschäftsbericht (2007)
[DVS10]	Deutscher Verband für Schweißen und Verwandte Verfahren e.V. (DVS): Richtlinie 2207-25, Schweißen von thermoplastischen Kunststoffen - Heizelementstumpfschweißen - Schweißen von Fensterprofilen aus PVC-U“, DVS-Verlag Düsseldorf (2010)
[DVS12-1]	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.: Virtuelles Museum der Fügetechnik –Kunststoffschweißen 1930 – 1939, <a href="http://www.dvs-aft.de/M/0/Tew/Kst/Kst19303901">http://www.dvs-aft.de/M/0/Tew/Kst/Kst19303901</a> (2012)

## 12. Literaturverzeichnis

---

- |           |  |
|-----------|--|
| [DVS12-2] | Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.: Taschenbuch DVS-Merkblätter und -Richtlinien – Fügen von Kunststoffen, Beuth Verlag GmbH, ISBN 978-87155-233-5 (Auflage 14) (2012)   |
| [DVS12-3] | Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V., Richtlinie 2208-1: Schweißen von thermoplastischen Kunststoffen - Maschinen und Geräte für das Heizelementstumpfschweißen von Rohren, Rohrleitungsteilen und Tafeln, Beuth Verlag GmbH, ISBN 978-87155-233-5 (Auflage 14) (2012) |
| [DVS12-5] | Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.: Forschungsbedarf zum Fügen von Kunststoffen im Leichtbau und im Bereich der erneuerbaren Energien, DVS-Berichte Band 294, ISBN 978-3-87155-612-8, DVS Media GmbH Düsseldorf (2012)   |
| [DVS12-6] | Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V., Richtlinie 2203-2: Prüfen von Schweißverbindungen aus thermoplastischen Kunststoffen - Zugversuch, Beuth Verlag GmbH, ISBN 978-87155-233-5 (Auflage 14) (2012)   |
| [Ege13]   | Egeplast international GmbH: „100 Jahre Lebensdauer“, Internetauftritt <a href="http://www.egeplast.de/kunststoff/polyethylen/">http://www.egeplast.de/kunststoff/polyethylen/</a> (2013)  |
| [Ehr04]   | Ehrenstein, G. W.: Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik, ISBN 3-446-22340-1, Carls Hanser Verlag München (2004)  |
| [Ehr07]   | Ehrenstein, G. W., Pongratz, S.: Beständigkeit von Kunststoffen – Band 1, Hanser Fachbuchverlag, ISBN 978-3-446-21851-2 (2007)   |
| [Ens09]   | Ensinger GmbH: Vorläufige Information zur Produkthandhabung TE-CARAN ABS, Ausgabe 00630/00 (2009)  |
| [Ewi10]   | Ewing, J., Gifford, A., Hubble, D., Vlachos, P., Wicks, A., Diller, T.: A direct-measurement thin-film heat flux sensor array, IOP Publishing, Measurement Science and Technology 21 (2010)  |
| [Fra02]   | Fralick, G., Wrbanek, J., Blaha, C. : Thin Film Heat Flux Sensor of Improved Design, 48th International Instrumentation Symposium San Diego (2002)   |
| [Gla13]   | Glaskeil Kunststoffe GmbH & Co. KG.: Technisches Datenblatt Polycarbonat (2013)  |
| [Gra11]   | Grahl, S., Beckmann, M.: Wärmestromdichtemessung an Membranwänden – Grundlagen und praktische Erfahrungen, Uhlig Symposium, TU-Dresden (2011)  |
| [Gre03]   | Grewell, D., Benatar, A., Park, J. B.: Plastics an Composites Welding Handbook, ISBN-10-3-446-19534-3, Carl Hanser Verlag München (2003)   |

[Gül99]	Gülhan, A.: Heat Flux Measurements in High Enthalpy Flows, German Aerospace Center (DLR), Institute of Fluid Mechanics, Paper presented at the RTO AVT Course on “Measurement Techniques for High Enthalpy and Plasma Flows” in Rhode-Saint-Genèse, Belgium (1999)
[HAB13]	HABA GmbH: HABA Alu28 Feingefräste Aluplatten, Produktdatenblatt AlMg4.5Mn0.7 / 5083 3.3547 (2013)
[HBM13-1]	Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Produktdarstellung Wegaufnehmer WI, <a href="http://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/b1118.pdf">http://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/b1118.pdf</a> (2013)
[HBM13-2]	Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Produktdarstellung Kraftaufnehmer S9M, <a href="http://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/b3021.pdf">http://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/b3021.pdf</a> (2013)
[HBM13-3]	Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Produktdarstellung Kraftaufnehmer U9C, <a href="http://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/b3813.pdf">http://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/b3813.pdf</a> (2013)
[HBM13-4]	Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH: Die Qual der Wahl: Piezoelektrische oder DMS-basierte Kraftaufnehmer, Internetpublikation <a href="http://www.hbm.com/de/menu/tipps-tricks/kraftmessung/die-qual-der-wahl-piezoelektrische-oder-dms-basierte-kraftaufnehmer/">http://www.hbm.com/de/menu/tipps-tricks/kraftmessung/die-qual-der-wahl-piezoelektrische-oder-dms-basierte-kraftaufnehmer/</a> (2013)
[Her08]	Herschold, G.: Machbarkeitsstudie für die Konzeption eines thermophysiologisch intelligenten Manikin zur Bestimmung der thermischen Behaglichkeit, Diplomarbeit FH Joanneum, <a href="http://www.theseus-fe.com/images/downloads/publications/herschold-thermopsychological-intelligent-manikin.pdf">http://www.theseus-fe.com/images/downloads/publications/herschold-thermopsychological-intelligent-manikin.pdf</a> (2008)
[Hig13]	Hightechflon GbR: PTFE Schweißfolien, <a href="http://www.hightechflon.com/teflon-Schweissfolien/Page-80-1.aspx">http://www.hightechflon.com/teflon-Schweissfolien/Page-80-1.aspx</a> (2013)
[Hoc11]	Hochrein, T., Alig, I.: Prozessmesstechnik in der Kunststoffaufbereitung, ISBN 978-3-8343-3117-5, Vogel Business Media GmbH & Co. KG, Würzburg (2011)
[Hof06]	Hoffie, A. F.: Convection Calibration of Schmidt-Boelter Heat Flux Gages in Shear and Stagnation Air Flow, Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University (2006)

## 12. Literaturverzeichnis

---

[Hub08]	Hubble, D. O., Diller, T. E., Vlachos, P. P.: An Investigation of the physical mechanism of heat transfer augmentation in boundary layer flows subject to freestream turbulence, Aether Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Virginia Polytechnic Institute & State University (2008)
[Hub09]	Hubble, D. O., Diller, T. E.: A Hybrid Method For Measuring Heat Flux, Virginia Polytechnic Institute and State University, Research Papers ASME.org (2009)
[Hub11]	Hubble, D. O.: An Experimental Investigation of the Mechanism of Heat Transfer Augmentation by Coherent Structures, Dissertation Virginia Tech Department of Mechanical Engineering, Advanced Experimental Thermofluids Research Laboratory (2011)
[Huk13]	Hukseflux Thermal Sensors B. V., <a href="http://www.hukseflux.com">www.hukseflux.com</a> , Internetauftritt (2013)
[Huk99]	Hukseflux Thermal Sensors B. V.: Application and specification of heat flux sensors, Version 9904; <a href="http://www.hukseflux.com">www.hukseflux.com</a> (1999)
[ISO91]	International Standard: Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Guarded hot plate apparatus, ISO 8302 (1991)
[ITI11]	International Thermal Instrument Company Inc., The HAT-50 Thermal flux meter, HT-50-Spec.pdf (2011)
[Keh07]	Kehr, M.: NMR-Untersuchungen zu inter- und intramolekularen Wechselwirkungen in Polymerschmelzen, Dissertation Universität Ulm, Fakultät für Naturwissenschaften (2011)
[Kes07]	Kessler, R. W.: Prozessanalytik: Strategien und Fallbeispiele aus der industriellen Praxis, ISBN 3-527-31196-3, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim (2007)
[Kir07]	Kirch, T.: Praktikum Fertigungstechniken der Elektronik – Thermosäule, Fachhochschule Wedel – Technische Informatik (2007)
[Kle01]	Klein, H., M.: Laserschweißen von Kunststoffen in der Mikrotechnik, Dissertation Rhein-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Fakultät für Maschinenwesen (2001)
[Kle09]	Kleinschnitz, S., Baudrit, B.: Erhöhung und Bewertung der Wirtschaftlichkeit beim Schweißen von PVC-Fensterprofilen; SKZ-online, <a href="http://www.skz-online.de/content/Joo/index.php?option=com_docman&amp;task=doc_view&amp;gid=417">http://www.skz-online.de/content/Joo/index.php?option=com_docman&amp;task=doc_view&amp;gid=417</a> (2009)
[KLN13]	KLN Ultraschall AG: Verfahrensbeschreibung für Heizelementstumpfschweißen, Internetauftritt <a href="http://www.kln.de/Heizelementschweien%20282%29.html">http://www.kln.de/Heizelementschweien%20282%29.html</a> (2013)

---



[Kra08-1]	Kraft, D., Baudrit, B., Bastian, M.: Heizelementstumpfschweißen von hochgefüllten WPC, <i>Joining plastics – Fügen von Kunststoffen</i> , Ausgabe 4 (2008)
[Kra08-2]	Kraus, E., Baudrit, B.: Warmgasextrusionsschweißen von PVC-U; <i>Plasticker-News</i> , <a href="http://plasticker.de/news/shownews.php?nr=5849&amp;div=&amp;start=0&amp;anzeige=14&amp;begriff=AIF&amp;PHPSESSID=6a6df6cb2770adf5895d91f8d0db9eef&amp;PHPSESSID=6a6df6cb2770adf5895d91f8d0db9eef&amp;klasse2=d12&amp;backto=&amp;PHPSESSID=6a6df6cb2770adf5895d91f8d0db9eef">http://plasticker.de/news/shownews.php?nr=5849&amp;div=&amp;start=0&amp;anzeige=14&amp;begriff=AIF&amp;PHPSESSID=6a6df6cb2770adf5895d91f8d0db9eef&amp;PHPSESSID=6a6df6cb2770adf5895d91f8d0db9eef&amp;klasse2=d12&amp;backto=&amp;PHPSESSID=6a6df6cb2770adf5895d91f8d0db9eef</a> (2008)
[Kra12-1]	Kraft, D., Eck, C., Baudrit, B., Bastian, M., Heidemeyer, P.: Modellierung und Simulation des Heizelementstumpfschweißprozesses mittels CFD (Computational Fluid Dynamics)-Software, <i>Joining plastics – Fügen von Kunststoffen</i> , Ausgabe 6 (2012)
[Kra12-2]	Kraft, D., Baudrit, B., Bastian, M., Heidemeyer, P.: Schweißen gleichartiger Kunststoffe mit stark unterschiedlichen rheologischen Eigenschaften, <i>Joining plastics – Fügen von Kunststoffen</i> , Ausgabe 2 (2012)
[Kru07]	Krüger, S., Beckmann, M.: Wärmestromdichtemessung an Membranwänden zur Charakterisierung von Belägen in Dampferzeugern für schwierige Brennstoffe, ISBN 978-3-935317-30-6, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky (2007)
[Kru13]	Kruse, B.-O.: Rede zur Jahrespressekonferenz des Gesamtverbandes der Kunststoffverarbeitenden Industrie e.V., Frankfurt, <a href="http://www.gkv.de/assets/files/bilder_pressemitteilungen/rede_kruse_endg.pdf">http://www.gkv.de/assets/files/bilder_pressemitteilungen/rede_kruse_endg.pdf</a> (2013)
[Lan51]	Langhaar, H. L.: <i>Dimensional Analysis and Theory of Models</i> , John Wiley & Sons, Inc., <a href="http://tocs.ulb.tu-darmstadt.de/33940819.pdf">http://tocs.ulb.tu-darmstadt.de/33940819.pdf</a> (1951)
[Las92]	Lassue, S., Duthoit, B., Théry, P.: <i>A Convective and Radiative Flux Sensor for Designing Thermal Confort Controllers</i> , Indoor and Built Environment (1992)
[Lie11]	Lienhard IV, J. H., Lienhard V, J. H.: <i>A Heat Transfer Textbook – Fourth Edition</i> , Phlogisten Press, Cambridge Massachusetts (2011)
[Löc13]	Löckenhoff, E.: Quo vadis Kunststoffrohr-Industrie?, <i>Jahresbericht 2012 Kunststoffrohrverband</i> , <a href="http://www.krv.de/images/stories/docs/publikationen/KRV_Jahresbericht2012_FINAL.pdf">http://www.krv.de/images/stories/docs/publikationen/KRV_Jahresbericht2012_FINAL.pdf</a> (2013)
[Med03]	Medtherm Corporation: Heat flux transducers and infrared radiometers for the direct measurement of heat transfer rates, 64 Series, Bulletin 118 (2003)
[Mes12]	MesoScribe Technologies Inc.: Harsh environment sensing, <a href="http://www.mesoscribe.com/application-areas/harsh-environment-sensing/">http://www.mesoscribe.com/application-areas/harsh-environment-sensing/</a> (2012)

## 12. Literaturverzeichnis

---

- |          |   |
|----------|---|
| [Mes13]  | MesoScribe Technologies Inc.: Direct Write Thermal Spray - 3D Digital Printing of Electronics and Sensors, Marketing-Brochure_ver2.0, <a href="http://www.mesoscribe.com/wp-content/uploads/2010/12/Marketing-Brochure_ver2.0.pdf">http://www.mesoscribe.com/wp-content/uploads/2010/12/Marketing-Brochure_ver2.0.pdf</a> (2013)                            |
| [Met13]  | Metrohm Schweiz AG: Atline-, Online- und Inline-Analysensysteme von Metrohm Applikon, <a href="http://pharma.metrohm.ch/Atline/">http://pharma.metrohm.ch/Atline/</a> (2013)  |
| [Mey07]  | Meyer, M.: Hochempfindlicher Wärmeflussensor, Dissertation ETH Zürich, Dis ETH Nr. 12266 (1997)   |
| [Mid09]  | Middeldorf, K.: Wertschöpfung und Arbeitsplätze durch Fügetechnik in Deutschland und Europa, <a href="http://www.die-verbindungs-spezialisten.de/fileadmin/user_upload/Broschueren/Kurz-text_Wertschoepfungs-studie_dt.pdf">http://www.die-verbindungs-spezialisten.de/fileadmin/user_upload/Broschueren/Kurz-text_Wertschoepfungs-studie_dt.pdf</a> (2009) |
| [Moc09]  | Mocikat, H., Herwig, H.: Heat Transfer Measurements with Surface Mounted Foil-Sensors in an Active Mode: A Comprehensive Review and a New Design, Sensor 2009-9, ISSN 1424-8220 (2009)  |
| [Mur05]  | Murthy, A. V., Fraser, G. T., DeWitt, D. P.: A Summary of Heat-Flux Sensor Calibration Data, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology 110 (2005)   |
| [Nag06]  | Nagaiah, N., R.: Novel polymer derived ceramic-high temperature heat flux sensor for gas turbine environment, Journal of Physics: Conference Series 34 458 (2006)   |
| [Nat92]  | Natrop, J.: Rechnergestützte Parameteroptimierung und Qualitätssicherung in der Serienfertigung am Beispiel des Heizelementschweißens, Schweißtechnische Forschungsberichte Band 48, Deutscher Verlag für Schweißtechnik DVS-Verlag GmbH Düsseldorf (1992)  |
| [Net13]  | Netzsch-Gerätebau GmbH, Guarded Hot Plate - GHP - Method, Instrumentation, Applications, Technical specification (2013)   |
| [Neu92]  | Neumann, R. D.: Temperature and heat flux measurements – challenges for high temperature aerospace application, University of Dayton, NAS Astrophysics Data System 1992NASCP3161S (1992)  |
| [New08]  | Newport Electronics: Thin-Film Heat Flux Sensors – Ideal for Precise Heat Transfer Measurement, <a href="http://www.newport.com">www.newport.com</a> (2008)   |
| [NIS05]  | NIST – Nation Institute of Standards and Technology: A Summary of Heat-Flux Sensor Calibration Data, Journal of Reasearch of the National Institute of Standards and Technology, Volume 110, Number 2 (2005)  |
| [Ori13F] | OriginLab Corporation: Gridding-Methoden für Daten mit zufälligem Abstand, <a href="http://www.originlab.de/www/helponline/Origin/de/UserGuide/Gridding_Methods_for_Randomly_Spaced_Data.html#Kriging_Correlation">http://www.originlab.de/www/helponline/Origin/de/UserGuide/Gridding_Methods_for_Randomly_Spaced_Data.html#Kriging_Correlation</a> (2013) |

[Per92]	Perry, J. M., Lee, L. J., Lee, C. W.: On-Line Cure Monitoring of Epoxy/Graphite Composites Using a Scaling Analysis and an Dual Heat Flux Sensor, Journal of Composite Materials Vol. 26 (1992)
[Pie75]	Pieschel, D.: Untersuchungen zur Optimierung der Wärmekontakt-schweißverfahren für Plastomere (Heizelementschweißen – Wärmeimpulsschweißen), Dissertation Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Fakultät für Maschinenwesen (1975)
[Pot04]	Potente, H.; Fügen von Kunststoffen- Grundlagen, Verfahren, Anwendung, ISBN 3-446-22755-6, Carls Hanser Verlag München Wien (2004)
[Pot08]	Potente, H., Schöppner, V.: Ermittlung verfahrenstechnischer Einsatzpotenziale und -grenzen des Heizelementschweißprozesses unter Berücksichtigung der Zykluszeit und Qualitätsoptimierung, Universität Paderborn, IGF-Abschlussbericht 13.954 N (2008)
[Pot77]	Potente, H.: Theorie des Heizelementstumpfschweißens, Kunststoffe 67 (1977)
[Pot83]	Potente, H.: Eine Analyse des Heizelement-Stumpfschweißens von Rohren aus teilkristallinen Thermoplasten, DVS-Bericht 84 (1983)
[Pot85]	Potente, H., Tappe, P., Scale Up Laws in Heated Tool Butt Welding of Semicrystalline Thermoplastics, Polymer Engineering and Science 29, <a href="http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pen.760292304/abstract">http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pen.760292304/abstract</a> (1985)
[Püt99]	Pütz, M.: Dynamik von Polymerschmelzen und Quellverhalten ungeordneter Netzwerke, Dissertation Johannes-Gutenberg-Universität, Fachbereich Physik (1999)
[Pro10]	Pro-K, Frühjahrstagung der pro-K Fachgruppe Kunststofffenstersysteme, PHI Technik für Fenster und Türen GmbH, Markt Erlbach (2010)
[Pul10]	Pullins, C. A., Diller, T. E.: In Situ High Temperature Heat Flux Sensor Calibration, VSGC Student Research Conference (2010)
[Pul11]	Pullins, C. A.: High Temperature Heat Flux Measurement: Sensor Design, Calibration, and Applications, Dissertation Virginia Polytechnic Institute and State University (2011)
[Rei02]	Reinarts, T. R.: High-Accuracy Heat Flux Rate Measurements for Launch Vehicles, John F. Kennedy Space Center, Research and Technology, Annual Report (2002)
[Rei13-1]	Reiff Technische Produkte GmbH: technisches Datenblatt ABS-Copolymer weiß (2013)
[Rei13-2]	Reiff Technische Produkte GmbH: technisches Datenblatt Polystyrol weiß (2013)

## 12. Literaturverzeichnis

[Sam13]	Sampath, R., Gambino, R., Longtin, J., Herman, H., Greenlaw, R.: Direct Write Thermal Spraying of Mesoscale Electronics and Sensor Structures – Novel Approaches to Integrating Sensors on Structures, <a href="http://www.lbenchindia.com/">http://www.lbenchindia.com/</a> , direct write technology.pdf (2013)
[Sch12]	Schmitt, M, Kraft, D., Baudrit, B.: Untersuchungen zur Entwicklung von innovativen und energieeffizienten Heizelementen für das Schweißen von Kunststoffen, bislang unveröffentlichte Diplomarbeit Süddeutsches Kunststoff-Zentrum (2012)
[Sch12b]	Schöppner, V., Friedrich, N., Henning, B.: Zykluszeitreduzierung ohne Qualitätsverlust beim Heizelementschweißen durch Zwangskühlung mittels Druckluft, <i>Joining Plastics – Fügen von Kunststoffen</i> 6 (2012)
[Sch12c]	Schöppner, V., Friedrich, N., Hoffschlag, J.: Cycle Time Reduction By Forced Air Cooling For Hot Plate Welding, <i>Welding in the World</i> Volume 56 (2012)
[Seq12]	Sequoia Technology Ltd.: Heat flux sensors, <a href="http://www.sequoia.co.uk/components/category.php?d=2&amp;c=23&amp;f=&amp;p=&amp;fmt=grid">http://www.sequoia.co.uk/components/category.php?d=2&amp;c=23&amp;f=&amp;p=&amp;fmt=grid</a> (2012)
[Sim13-1]	Simona AG: Technisches Datenblatt PE-HWU, <a href="http://www.simona.de">www.simona.de</a> (2013)
[Sim13-2]	Simona AG: Technisches Datenblatt PP-DWU, <a href="http://www.simona.d">www.simona.d</a> (2013)
[Sim13-3]	Simona AG: Technisches Datenblatt PVC-CAW, <a href="http://www.simona.d">www.simona.d</a> (2013)
[Spi09]	Spiegel, W., Herzog, R., Jordan, R., Magel, G., Müller, W., Schmidl, W.: Anwendung sensorischer Prozessinformationen am Beispiel der Korrosionsfrüherkennung; <a href="http://chemin.de/Publikationen/PDF/vo-63-0.pdf">http://chemin.de/Publikationen/PDF/vo-63-0.pdf</a> (2009)
[Suj05]	Sujay, R-M.: Design and Calibration of a Novel High Temperature Heat Flux Sensor, Dissertation Virginia Polytechnic Institute and State University, <a href="http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-04122005-141730/unrestricted/sujaymastersthesis.pdf">http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-04122005-141730/unrestricted/sujaymastersthesis.pdf</a> (2005)
[Tap89]	Tappe, P.: Modellgesetze beim Heizelementstumpfschweißen teilkristalliner Thermoplaste, Dissertation, Universität Paderborn (1989)
[Tfx10]	Tfx SA: TFX-161 Datasheet, TFX-161-C-enFlatsensor.pdf (2010)
[Tra94]	Trageser, G.: Polymere – beim Schlängeln ertappt, <i>Spektrum der Wissenschaft</i> 1, Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH (1994)
[Tsa04]	Tsai, B. K., Gibson, C. E., Murthy, A. V., Early, E. A., Dewitt, D. P., Saunders, R. D.: Nist Measurement services: Heat-Flux Sensor Calibration, NIST Special Publication 250-65 (2004)

[Ven11]	Venkatesan, S. P.: Heat flux – Mechanical Measurements, Indian Institute of Technology Madras, <a href="http://nptel.ac.in/courses/IIT-MADRAS/Mechanical_Measurements_Metrology/pdf/3_1.pdf">http://nptel.ac.in/courses/IIT-MADRAS/Mechanical_Measurements_Metrology/pdf/3_1.pdf</a> (2011)
[VDI06]	Verein Deutscher Ingenieure (VDI): VDI-Wärmeatlas, ISBN 978-3-540-25504-8, 10. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2006)
[WID13]	WIDOS Wilhelm Dommer Söhne GmbH, Produktdarstellungen im Internet <a href="http://www.widos.de">www.widos.de</a> (2013)
[Woo89]	Wool, R. P., Yuan, B. L., McGarel, O. J.: Welding of Polymer Interfaces, Polymer Engineering and Science 29(19) (1989)
[Wra14]	Wrana, C.: Polymerphysik – Eine physikalische Beschreibung von Elastomeren und ihren anwendungsrelevanten Eigenschaften, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-642-45075-4 (2014)
[Wrb12]	Wrbanek, J. D., Fralick, G. C., Zhu, D.: Ceramic thin film thermocouples for SiC-based ceramic matrix composites, University of Nebraska, NASA Publications Paper 97 (2012)
[Wun11]	Wuntronic Mess-, Steuer- und Regeltechnik GmbH: High Temperature Heat Flux Sensors (Thermal Flow) – For Industry, Laboratory and Research – Series FCR, <a href="http://www.wuntronic.de">www.wuntronic.de</a> (2011)
[Zee78]	De Zeeuw, K.: Untersuchungen zur Qualitätssicherung von Kunststoffschweißnähten, Dissertation RWTH Aachen (1978)
[Zöh66]	Zöhren, J.: Das fertigungsgerechte Fügen der Polyolefine durch Warmgas- und Heizelementschweißen, Dissertation RWTH Aachen (1966)

### 13. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Vereinfachte Darstellung des Verbindungsmechanismus bei Heizelementstumpfschweißen	6
Abbildung 2:	Doi-Edwards-Modell zur Verdeutlichung einer einfachen und einer realen Polymerkette zur Beschreibung des Reptationsmodells [Doi86]	8
Abbildung 3:	Reptationsmodell einer Polymerkette in einer verschlachten Polymerschmelze ( $0 < t_1 < t_2 \leq t_r$ ) [Doi86]	9
Abbildung 4:	Makromoleküle gestreckt in Folge der Dehnströmung (links), relaxiert nach dem Fügen (rechts) [Doi86]	10
Abbildung 5:	Heizelementstumpfschweißapparat für Platten der Fa. WIDOS Wilhelm Dommer Söhne GmbH (oben), Prinzipdarstellung einer Schweißapparat zur Verdeutlichung der Einbaupositionen aktueller Sensortechnologie	14
Abbildung 6:	Druck- (oben) und Wegverlauf (unten)	15
Abbildung 7:	Temperaturverlauf beim Heizelementstumpfschweißen und Definition der Schmelzschichtdicke sowie weiterer relevanter Temperaturkenngrößen [Pot04]	16
Abbildung 8:	Einordnung von Offline-, Atline-, Online und Inline-Analysemethoden bzgl. ihrer Totzeit (Totzeit $\triangleq$ Zeitraum zwischen Probenentnahme und fertigem Ergebnis der Analyse) und der resultierenden Eignung zur Prozessregelung und Ausschussminimierung [Hoc11]	18
Abbildung 9:	Geschichtliche Einordnung relevanter Entwicklungsstufen des Heizelementstumpfschweißens [3Pi13, DKM12, Ehr04, Gre03, Mic87, Nat92, Pie75, Pot77, Pot85, Tap89, Zee78, Zöh66]	23
Abbildung 10:	Darstellung zur Erläuterung und Abgrenzung Fügeschwindigkeit - Fließgeschwindigkeit	25
Abbildung 11:	Druck- und Wegverlauf über die Messzeit für die Angleichphase [Nat92, angepasst]	26
Abbildung 12:	Darstellung des Wegverlaufs sowie des Kraftverlaufs über die Messzeit für die Angleichphase	28
Abbildung 13:	Berechnetes Temperaturprofil für die Anwärmphase [Pot04, Tap89]	33
Abbildung 14:	Diagramm zur Bestimmung der optimalen Heizelementtemperatur <b>TH</b> für amorphe und teilkristalline Thermoplaste nach [Pot04]; <b>TH</b> = Heizelementtemperatur [°C] <b>TFl</b> = Fließtemperatur [°C] (Kristallitschmelztemperatur <b>TK</b> bei teilkristallinen, Glasübergangstemperatur <b>Tg</b> bei amorphen Thermoplasten)	35

Abbildung 15:	Diagramm zur Bestimmung des optimalen Verhältnisses aus Schmelzschichtdicke <b>L0</b> und Bauteilwanddicke <b>d</b> für amorphe und teilkristalline Thermoplaste nach [Pot04]; <b>L0</b> = Schmelzschichtdicke [mm]	36
Abbildung 16:	Mikroskopisch bestimmte Schmelzschichtdicke nach der Anwärmphase (links oben); Restschmelzschichtdicke nach der Fügephase (rechts unten) über die Methode des Beflammens	37
Abbildung 17:	Effektive Temperaturleitfähigkeit für ABS und PPN nach [Nat92]	39
Abbildung 18:	Diagramm zur Bestimmung des optimalen Verhältnisses aus Fügeweg <b>sF</b> und Schmelzschichtdicke <b>TH</b> für amorphe und teilkristalline Thermoplaste nach [Pot04]; <b>sF</b> = Fügeweg [mm], <b>L0</b> = Schmelzschichtdicke [mm]	41
Abbildung 19:	Explosionszeichnung eines Heizelements;	44
Abbildung 20:	Darstellung zur Ermittlung der materialspezifischen Kennwerte $c_1$ , $c_2$ , und $c_3$ nach [Tap89]; Notwendige Kurvenverläufe, Parametervariationen, Temperaturen, Dimensionsvariationen	47
Abbildung 21:	Darstellung der Ergebnisse einer Parametervariation für Polyethylen, erstes Diagramm Schweißfaktor über Angleich- und Fügedruck, zweites Diagramm $L_0/d$ über Angleich- und Fügedruck, drittes Diagramm $sF/L_0$ über Angleich- und Fügedruck	49
Abbildung 22:	Darstellung der zwei Arten von Wärmeleitung	52
Abbildung 23:	Schematische Darstellung des Seebeck-Effekts [Ber04]	58
Abbildung 24:	Aufbau eines Wärmestromsensors unter Ausnutzung des Seebeck-Effekts [Mey07, angepasst]	58
Abbildung 25:	Guarded Hot Plate Fa. Netzsch-Gerätebau GmbH [Net13]	62
Abbildung 26:	Kalibrationsaufbau für Wärmestromsensoren, Generieren eines Wärmestroms über Konvektion [Suj05]	63
Abbildung 27:	CAD-Model eines Kalibrationssystems für hochtemperaturbeständige Wärmestromsensoren [Pul11]	63
Abbildung 28:	Stark vereinfachte Darstellung eines realen Versuchsaufbaus unter Berücksichtigung der auftretenden Wärmeströme und Konvektionserscheinungen	66
Abbildung 29:	Darstellung möglicher Probekörpergeometrien zur Bestimmung der Kurzzeit-Zugfestigkeit nach DVS 2203 Teil 2 [DVS12-6]	74

### 13. Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 30:	Typische Spannungs-Dehnungskurven für zähe Werkstoffe mit Streckgrenze und spröde Werkstoffe gemäß der DIN EN ISO 527-1 [DIN96]	75
Abbildung 31:	Heizelementstumpfschweißapparatur Fa. WIDOS Wilhelm Dommer Söhne GmbH	77
Abbildung 32:	Darstellung Wärmestromsensor Fa. ITI Company	80
Abbildung 33:	Darstellung Wärmestromsensor Fa. MesoScribe Technologies Inc.	81
Abbildung 34:	Zeichnung Wärmestromsensor Fa. MesoScribe Technologies Inc. (siehe auch vergrößerte Darstellung im Anhang Abschnitt 15.1)	81
Abbildung 35:	Darstellung des Direct Write Thermal Spray – Verfahrens der Fa. MesoScribe Technologies Inc. zur Herstellung von ultradünnen und hochbelastbaren Wärmestromsensoren [Mes13]	82
Abbildung 36:	Darstellung des Versuchsaufbaus für einen Sensor der Fa. MesoScribe Technologies Inc., Gesamtdarstellung des verwendeten Heizsystems (links); Detailedarstellung in Form einer Explosionszeichnung (rechts) (siehe auch vergrößerte Darstellung im Anhang)	83
Abbildung 37:	Darstellung des Simulationsaufbaus sowie der daraus generierten Auswertungsmöglichkeiten	88
Abbildung 38:	Darstellung des gemessenen Kraft-, Weg- und Wärmestromverlaufs für einen Schweißprozess von Polyethylen	90
Abbildung 39:	Abstrahierter Signalverlauf eines Wärmestromsensors für einen kompletten Schweißzyklus	91
Abbildung 40:	Aufzeichnung Spannungssignal Wärmestromsensor und Temperatursignal Thermoelement Wärmestromsensor für einen Aufheizvorgang des Heizelements von Raumtemperatur bis 240°C; Sensor Fa. ITI-Company;	93
Abbildung 41:	Darstellung des Spannungssignals des Wärmestromsensors über die Messzeit für verschiedene Heizelementtemperaturen	94
Abbildung 42:	Abstraktion der Einrichtphase	96
Abbildung 43:	Darstellung des Spannungssignals des Wärmestromsensors über die Messzeit in der Bewegungsphase vor Angleichen	98
Abbildung 44:	Abstraktion der Bewegungsphase vor Angleichen	99
Abbildung 45:	Darstellung des Spannungssignals des Wärmestromsensors über die Messzeit in der Bewegungsphase vor Angleichen	100



### 13. Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 46:	Darstellung des Kraftverlaufs, Wegverlaufs und des Spannungssignals des Wärmestromsensors für einen bewusst schräg eingelegten Probekörper über die Messzeit	103
Abbildung 47:	Darstellung des Spannungssignals des Wärmestromsensors über die Messzeit für verschiedene Probekörperflächen	105
Abbildung 48:	Darstellung des Spannungssignals des Wärmestromsensors über die Messzeit für verschiedene Angleichzeiten	107
Abbildung 49:	Abstraktion der Angleichphase	109
Abbildung 50:	Darstellung möglicher Fitfunktionen für die Angleichphase des Spannungssignals des Wärmestromsensors über die Messzeit	111
Abbildung 51:	Abstraktion Ende der Angleichphase	113
Abbildung 52:	Darstellung des Spannungssignals des Wärmestromsensors über die Messzeit für verschiedene Materialien	114
Abbildung 53:	Abstraktion der Anwärmphase	115
Abbildung 54:	Darstellung einer möglichen Fitfunktion für die Anwärmphase des Spannungssignals des Wärmestromsensors	116
Abbildung 55:	Abstraktion der Umstellphase	118
Abbildung 56:	Darstellung einer möglichen Fitfunktion für die Anwärmphase des Spannungssignals des Wärmestromsensors über die Messzeit	119
Abbildung 57:	Darstellung der Kraft, des Weges und des Spannungssignals des Wärmestromsensors über die Messzeit für den kompletten Schweißzyklus inklusive Umstell-, Füge- und Handlingzeit	122
Abbildung 58:	Darstellung der Kurzzeit-Zugfestigkeit über die Anwärmzeit und die Heizelementtemperatur für verschiedene Schweißparameter	126
Abbildung 59:	Darstellung der Ergebnisse aus Abbildung 16 in der Form Wärmestrom über Kurzzeitzugfestigkeit	127
Abbildung 60:	Darstellung der formalen Zusammensetzung von <b><math>q3D</math></b>	130
Abbildung 61:	3D-Darstellung der Messdaten Heizelementtemperatur und Wärmestromdichteinformation <b><math>q3D</math></b> über das Qualitätskriterium Schweißfaktor für PE	131
Abbildung 62:	3D-Darstellung der Messdaten Heizelementtemperatur und Wärmestromdichteinformation <b><math>q3D</math></b> über das Qualitätskriterium Schweißfaktor überlagert mit dem Ergebnis einer Kriging-Korrelation (links); Projektion der 3D-Darstellung in die XY-Ebene (rechts); Material PE	132

### 13. Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 63:	3D-Darstellung der Messdaten Heizelementtemperatur und Wärmestromdichteinformation <b>q3D</b> über das Qualitätskriterium Schweißfaktor überlagert mit dem Ergebnis einer Kriging-Korrelation (links); Projektion der 3D-Darstellung in die XY-Ebene (rechts); Material ABS	133
Abbildung 64:	3D-Darstellung der Messdaten Heizelementtemperatur und Wärmestromdichteinformation <b>q3D</b> über das Qualitätskriterium Schweißfaktor überlagert mit dem Ergebnis einer Kriging-Korrelation (links); Projektion der 3D-Darstellung in die XY-Ebene (rechts); Material PC	134
Abbildung 65:	3D-Darstellung der Messdaten Heizelementtemperatur und Wärmestromdichteinformation <b>q3D</b> über das Qualitätskriterium Schweißfaktor überlagert mit dem Ergebnis einer Kriging-Korrelation (links); Projektion der 3D-Darstellung in die XY-Ebene (rechts); Material PP	135
Abbildung 66:	3D-Darstellung der Messdaten Heizelementtemperatur und Wärmestromdichteinformation <b>q3D</b> über das Qualitätskriterium Schweißfaktor überlagert mit dem Ergebnis einer Kriging-Korrelation (links); Projektion der 3D-Darstellung in die XY-Ebene (rechts); Material PS	136
Abbildung 67:	3D-Darstellung der Messdaten Heizelementtemperatur und Wärmestromdichteinformation <b>q3D</b> über das Qualitätskriterium Schweißfaktor überlagert mit dem Ergebnis einer Kriging-Korrelation (links); Projektion der 3D-Darstellung in die XY-Ebene (rechts); Material PVC	137
Abbildung 68:	Überlagerung der Projektionen der 3D-Darstellungen in XY-Ebene; Heizelementtemperatur und Wärmestromdichteinformation <b>q3D</b> über das Qualitätskriterium Schweißfaktor; Material PC, PS, ABS, PVC, PP, PE	139
Abbildung 69:	Überlagerung der Projektionen der 3D-Darstellungen in XY-Ebene; Heizelementtemperatur und Wärmestromdichteinformation <b>q3D</b> über das Qualitätskriterium Bruchdehnung; Material PC, PS, ABS, PVC, PP, PE	140
Abbildung 70:	Möglichkeit zur Abschätzung der Anwärmzeit bei gegebener Wärmestromdichteinformation <b>q3D</b> für verschiedene Polymere	141
Abbildung 71:	Darstellung alternativer Auswertung auf Basis spezifischer Kennwerte sowie eines Toleranzfeldes ohne Kalibration des Wärmestromdichteverlaufs	143

Abbildung 72:	Ergebnisse des Vergleichs real bestimmter Schmelzschichtdicken (SSD) mit der simulierter Schmelzschichtdicken unter Berücksichtigung relevanter Einflussfaktoren während der Anwärmzeit beim Heizelementstumpfschweißen von Polyethylen; Heizelementtemperatur 220°C	145
Abbildung 73:	Vergleich einer Simulation mit und ohne Atmosphäre (links; simulierte Anwärmzeit jeweils 120s); grafische Darstellung des Einflusses der Wulstausbildung auf Wirkung der Wärmestrahlung (rechts);	147
Abbildung 74:	Darstellung der für die Berechnung herangezogene ideale Wulstausformung für eine Heizelementstumpfschweißung mit einer Heizelementtemperatur von 220°C bei Polyethylen und einer Anwärmzeit bis 120s	148
Abbildung 75:	Veranschaulichung des Wärmestromeintrags in den Probekörper	149
Abbildung 76:	Ergebnisse des Vergleichs real bestimmter Schmelzschichtdicken (SSD) mit der simulierter Schmelzschichtdicken unter Nutzung des real gemessenen Wärmestroms mittels Wärmestromsensor als Energiequelle für die Plastifizierung einer Polyethylenprobe	151
Abbildung 77:	Darstellung zur Positioniergenauigkeit einer Kunststoffprobe auf einem Wärmestromsensor (Übersichtsdarstellung, Detaildarstellung A und B)	152
Abbildung 78:	Darstellung der Spannungssignale des Wärmestromsensors für zwei Probekörper positioniert auf dem Sensor an der Stelle X und zwei Probekörper	153
Abbildung 79:	Vergleich einer konventionellen Schweißung mit einer Schweißung, bei der das Heizelement verschmutzt war; Messwertaufzeichnung (oben), Realdarstellung (unten); Detail I: Detektion über Versatz Grundniveau; Detail II: Detektion über verringertes Spannungssignal des Wärmestromsensors in der Angleichphase; Detail III: Detektion über höheres Niveau in der Anwärmphase	155
Abbildung 80:	Vergleich einer konventionellen Schweißung mit und ohne Zersetzungserscheinungen in der Anwärmphase;	156
Abbildung 81:	Darstellung zur Aussagekraft der Wärmestrombilanzierung anhand eines Schweißzyklus mit großen und kleinem Drucksprung zwischen Angleich- und Anwärmphase;	158
Abbildung 82:	Darstellung zur Aussagekraft der Wärmestrombilanzierung gegenüber einer Kraft- und Wegaufzeichnung anhand eines Schweißzyklus mit großem und kleinem Drucksprung zwischen Angleich- und Anwärmphase;	159

### 13. Abbildungsverzeichnis

---

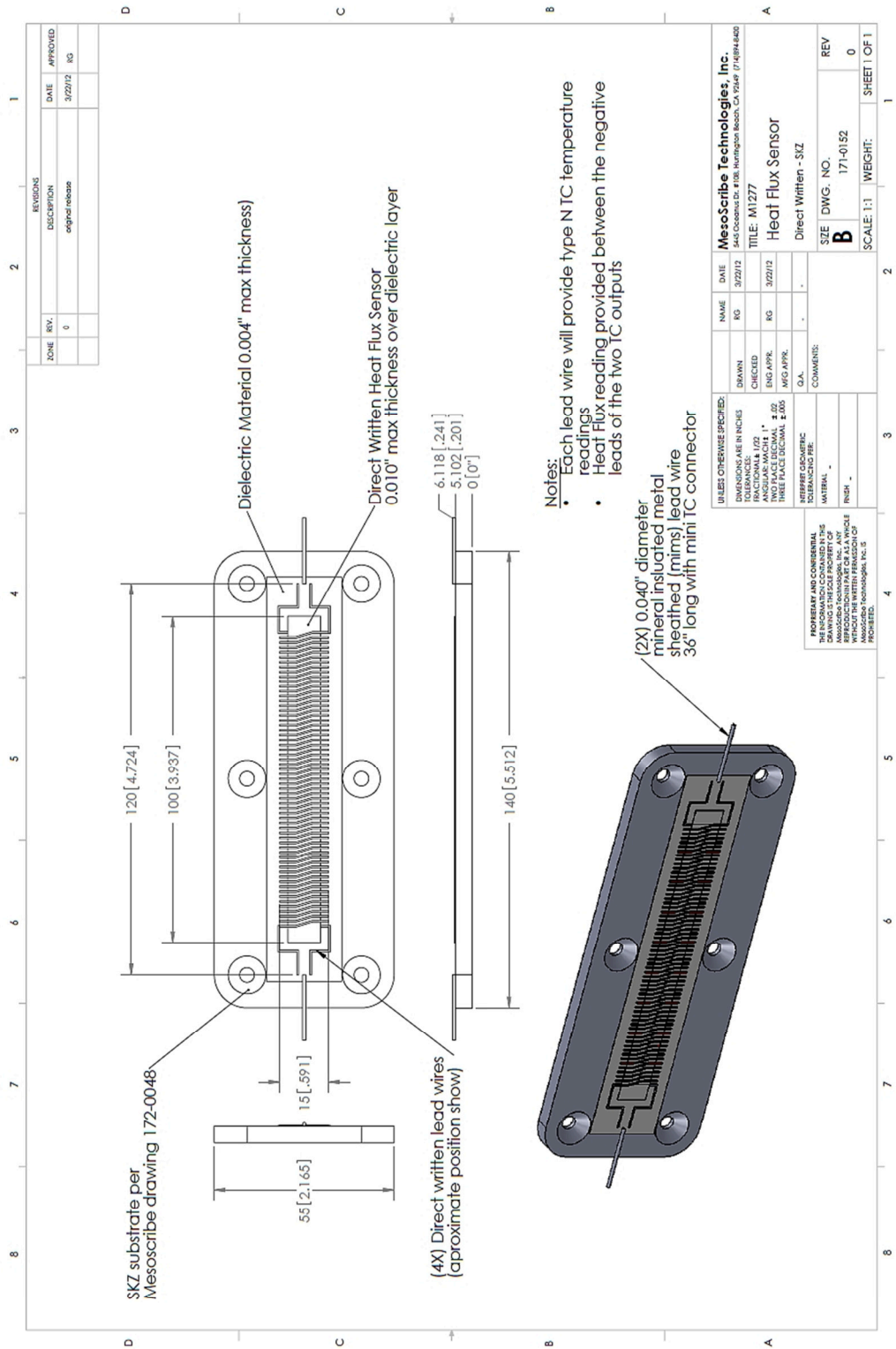
Abbildung 83:	Heizelementstumpfschweißen einer Beleuchtungseinheit eines PKW's; komplexe dreidimensionale Geometrie [Bie13]	161
Abbildung 84:	Darstellung des Spannungssignals des Wärmestromsensor und der Temperatur des Thermoelements im Wärmestromsensor über die Messzeit	162
Abbildung 85:	Prinzipielle Bilanzierung eines Heizelementes für das Heizelementstumpfschweißen von Kunststoffen	168
Abbildung 86:	Energetisch ermitteltes Einsparpotential für Emissionskoeffizient $> 0,9$ und $< 0,3$	170
Abbildung 87:	Energetisch ermitteltes Einsparpotential für das Heizelement über die Nutzung einer Einhausung	171
Abbildung 88:	Gegenüberstellung von Ansätzen zur Generierung eines Endprodukts aus zwei Fügeteilen unter Berücksichtigung des In- und Outputs für diese Ansätze	174

**14. Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1:	Analysemethoden, deren Merkmale und Beispiele für das Heizelementstumpfschweißen [Hoc11, Kes06, Met13]	18
Tabelle 2:	Effektive Temperaturleitfähigkeit als Konstante für verschiedene Thermoplaste nach [Pot04]	35
Tabelle 3:	Prüfbedingungen Zugversuch gemäß DVS 2203-2	75
Tabelle 4:	Apparaturen zur Bestimmung der Materialkennwerte für die Simulation mittels COMSOL	87
Tabelle 5:	Grundlegender Datensatz zur Erstellung eines 3D-Oberflächenplots	129
Tabelle 6:	Wärmestrombilanz für ein konventionelles Heizelement mit und ohne PTFE-Beschichtung	168

15. Anhang

15.1. Zeichnung Wärmestromsensor Fa. MesoScribe Technologies Inc.



## 15.2. Versuchsaufbau Wärmestrombilanzierung am Beispiel des Wärmestromsensors der Fa. MesoScribe Technologies Inc.

